



TITLE:

画像データを用いた都市高速道路合流部における車両追従挙動モデル構築及び車両間の異質性に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

洪, 多禧

CITATION:

洪, 多禧. 画像データを用いた都市高速道路合流部における車両追従挙動モデル構築及び車両間の異質性に関する研究. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k14922>

RIGHT:

画像データを用いた都市高速道路合流部に
おける車両追従挙動モデル構築及び車両間の
異質性に関する研究

2009年

洪 多 禧

序

道路交通事故や渋滞は、多くの国で早急に緩和しなければならない深刻な問題の一つと考えられている。これらの交通問題は主に人の意志決定に起因し、車両間の相互作用の結果として生じている。持続可能で安全な社会への貢献を目指し、貴重な時間・資源の損失を避けるためには、総合的な道路の交通の安全・効率化対策を適用する必要がある。ITS(Intelligent Transportation System)をはじめとした種々の交通安全・効率化施策の実効性を高めるためには、交通事故や渋滞などが発生するメカニズムを理解することが強く望まれる。特にそこに直接的に影響を及ぼす運転者の行動及び特性を詳細に分析する必要がある。すなわち、道路交通問題を解決緩和・解決するための方策の立案・評価のためには、運転者の行動分析・把握が重要であると考えられる。ITSの開発の経緯に着目すると、利用者への情報提供や自動課金のための車内や道路周辺のITSシステムは、早くから開発されているのに対し、運転者の行動の理解を目的としたITSの利用は研究途上にあるといえる。一方、運転者の行動に関しては、1950年代末から追従行動、車線変更行動、合流行動などの動的な運転者行動の研究が盛んに実施されてきた。各種交通問題に車両挙動が及ぼす影響の重要性が認識されるとともに、運転者行動の理解・分析に関する研究が活発に実施されて来ている。道路交通マネジメントの観点で運転者の行動を考慮した各種の対策やその評価方法に焦点が当てられている。そのために、まず、ミクロ水準で運転者の行動を理解することが必要とされているし、車両間の相互作用を詳細に分析・把握することは重要であり、このような動きをすべて含む総合的なモデル(交通シミュレーション)が、各種施策の立案・評価の上で必要である。

本研究ではビデオ画像から軌跡データを抽出して、ミクロな観点で車両挙動のモデルを構築する。実際、運転者行動は、周辺道路環境や交通特性によって多様に応じる‘車両挙動の乱れ’が現れる。運転者の多様性は交通問題に重要な鍵を提供できることに、かかわらず今まで運転者の多様性を考慮した研究は少ない。多様な車両挙動を示すため、本研究では運転者の異質性を考慮して追従及び合流挙動を分析・交通シミュレーションを行う。交通渋滞や事故原因となる運転者の行動を明確にできたら、それを抑制する施策への提案が可能になると期待できる。また、交通シミュレーションの再現によって、道路の効率性及び安全性の向上に寄与することを期待する。

なお、本論文はミクロな車両追従及び合流挙動に関する今までの研究成果をまとめたものであり、この研究により、渋滞や事故の発生メカニズムについて理解が深まると期待でき、交通安全性・効率性の改善に資する施策の提案が可能になることを望んでいる。

2009年

洪 多禧

[目 次]

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景及び目的	1
1.2 本研究内容の構成	4
第1章 参考文献	6
第2章 ビデオ画像データを利用した車両行動分析の意義	8
2.1 概説	8
2.2 ビデオ画像データに関する研究	8
2.3 単独車両追従挙動に関する研究	10
2.3.1 Gazis-Herman-Rothery model (GM model)	11
2.3.2 Safety distance or collision avoidance models(CA models)	13
2.3.3 Linear model(Helly model)	15
2.3.4 Fuzzy Logic-based Model	17
2.3.5 Psychophysical or action point model(AP)	18
2.3.6 Optimum Velocity model(Bando model)	19
2.3.7 Trajectory following model	20
2.4 多重追従モデルに関する研究	22
2.4.1 Lenz model	22
2.4.2 Bexelius model	23
2.4.3 Generalized Helly Model	24
2.4.4 多重車両追従モデルの比較	25
2.5 本研究の特性及び位置づけ	26
2.6 結論	27
第2章 参考文献	29
第3章 車両挙動データの抽出	37
3.1 概説	37

3.1.1	分析対象区間の概要	37
3.1.2	分析対象区間の交通状況	38
3.2	画像データから車両軌跡データの抽出	41
3.2.1	ビデオカメラの設置位置	41
3.2.2	画像データの映像処理方法	45
3.2.3	画像データから目視による車両軌跡の取得	46
3.3	目視による車両軌跡データの連結及び平滑化	48
3.3.1	車両軌跡データの連結	48
3.3.2	車両軌跡データの平滑化	51
3.4	結論	53
第3章	参考文献	54

第4章 運転者間の異質性を考慮した車両追従挙動分析 56

4.1	概説	56
4.2	追従車両の定義及び抽出	57
4.3	車両追従モデル	59
4.3.1	車両追従モデルの概要	59
4.3.2	モデルの推定方法	61
4.4	追従車両モデルのパラメータ推定及び基礎分析	62
4.4.1	個別モデルのパラメータ推定結果	62
4.4.2	各車両追従モデルの決定係数と反応時間の比較	65
4.4.3	Hellyモデルの推定パラメータの吟味	67
4.5	推定パラメータに基づく運転者間の異質性の分析	70
4.5.1	推定パラメータの分布	70
4.5.2	時空間平均密度による追従挙動への影響	73
4.5.3	走行車線の差異による追従挙動への影響	77
4.5.4	区間特性の差異による影響	81
4.6	結論	84
第4章	参考文献	86

第5章 多重追従挙動モデルの推定とドライバー挙動の異質性に

	関する分析	90
5.1	概説	90

5.2	多重車両追従モデル(Multi-anticipative car following model).....	91
5.2.1	Lenz model.....	92
5.2.2	Generalized Helly Model	93
5.2.3	多重車両追従モデルの比較と選定	94
5.3	多重追従行動の定義及び利用データ	95
5.4	多重車両追従モデルのパラメータの推定方法	97
5.5	多重追従挙動モデルの推定結果に基づく追従行動の検証	99
5.5.1	多重追従モデルの推定結果の分析	99
5.5.2	単独追従行動に対する多重追従行動の検証	101
5.6	運転者間の異質性の分析	103
5.6.1	推定パラメータの分布の比較	103
5.6.2	運転者の行動のクラスタ化	106
5.6.3	多重追従挙動モデルを仮定した場合の追従車両の反応の差異	108
5.7	道路幾何構造による多重追従行動の分析	112
5.7.1	区間別多重車両追従モデルの比較	112
5.7.2	区間別最適モデルのパラメータの比較	116
5.7.3	区間別平均反応時間の比較	120
5.8	結論	122
第5章	参考文献	124

第6章 合流部における多重追従挙動に関する分析..... 128

6.1	概説	128
6.2	合流車両と走行本車線の2車両との走行挙動分析	129
6.2.1	合流の定義及び合流状態の分類	130
6.2.2	合流車両の挙動分析	135
6.3	合流車両の多重追従合流挙動の分析	143
6.3.1	分析の概要	143
6.3.2	多重追従合流車両の定義及び抽出	146
6.3.3	多重追従モデル及び推定方法	151
6.3.4	分析結果を利用した多重追従合流挙動の分析	155
6.3.5	本来の多重追従挙動と合流車両の合流追従挙動の比較	167
6.4	多重追従合流挙動のシミュレーション	168
6.4.1	多重追従合流挙動のシミュレーションの概要	168
6.4.2	多重追従合流挙動シミュレーションの検証方法	170
6.5	結論	183

第6章 参考文献	186
第7章 結論.....	190
7.1 本研究の成果	190
7.2 今後の課題	194

第 1 章 序論

1.1 研究の背景及び目的

道路の交通事故や渋滞は、多くの国で早急に緩和しなければならない深刻な問題の一つと考えられている。これらの交通問題は主に人の過失によって発生する。持続可能な社会を目指し貴重な時間の損失を避けるためには、総合的な道路の交通安全対策を適用する必要がある。様々な道路交通安全対策が考えられている中、道路分野の研究では ITS(Intelligent Transportation System)が注目されている。ITS は、交通事故や渋滞などの交通問題の解決を図るために最先端の機械と通信技術を使った交通システムであり、カーナビゲーションや VICS (Vehicle information and Communication System; 道路交通情報通信システム), ACC (Adaptive Cruise Control; 車間距離制御システム), AVCSS (Advanced Vehicle Control and Safety System; 自動運転システム), ATIS(Advanced Traveller Information System; 道路交通情報提供システム) などがある。このような多様な ITS のシステムは、道路交通を把握して、交通状況の変化に即応した交通規制や誘導などの交通の処理を体系的に行うことで道路の効率性及び安全性を高めるための交通管理方策として導入されている。しかし、そのためには道路の効率・安全性を向上するために ITS を含めた効果的な方法を議論する前に、まずは交通事故や渋滞などが発生するメカニズムを理解しなければならない。すなわち、交通事故や渋滞メカニズムに直接的に影響を及ぼす運転者の行動特性を詳細に分析する必要がある。この運転者の行動や特性を理解することが、交通システム評価やオペレーションの決定に重要な役割を果たす。様々な交通問題を解決するための対策としてまずは運転者の行動分析が重要であるが、上で示した車内や道路周辺の ITS システムは早くから開発されているのに対し、運転者の行動を理解するためのシステムは、あまり存在しない。よって、運転者の行動を考慮した新しいシステムの開発とその効果を評価する方法が求められている。

運転者の行動に関しては、交通分野において、1950 年代末から追従挙動、車線変更挙動などの動的な運転者行動の研究 (Chandler et al.,(1958), Gazis et al.,(1958), Herman et al.,(1959), Edie.(1961), Gipps(1986)など) が増えてきている。また、運転者の行動による交通事故や渋滞などの交通問題が社会的に目立つことから、道路マネジメントの観点で運転者の行動を考慮した各種

の対策やその評価方法に焦点が当てられている．そのために，ミクロな運転者の行動を理解することが必要とされている．従来は簡易な地点観測のデータしか得られなくて，ミクロな運転行動を表現することができなかった．しかし，近年の情報処理技術の進展により，高精度カメラを用いた精緻なビデオ画像が取得可能になって，ビデオ画像を用いることで車両挙動をより詳細に把握可能なデータが入手可能となって，これによって複雑な運転行動が現れる合流区間の車両挙動に対しても詳細に把握することが可能になった．

運転者は「認知」「判断」「操作」という一連の動作を瞬時に行わなければならないので，これにより交通コンフリクトや事故が発生する．さらに，合流区間では一般区間に比べて運転負荷が大きく，交通コンフリクトや事故などの危険な状態が起こしているといえる．そのため合流区間では，合流の見送りによる渋滞や交通コンフリクトによる交通安全性および効率性の点で多種多様な問題が生じやすい．また，合流区間内では，横の動き(e.g., merging, giving way and cutting in across the stream of traffic)と縦の動き(e.g. car following behaviour along the stream of traffic)のすべての動きが存在するので，合流区間の運転者は自分の位置だけではなく，他の車両の位置すなわち車両間の縦と横の距離を認知して走行するようになる．これらのすべての動きが交通問題を起こすから，一般区間，特に合流区間において車両挙動ならびに車両間の相互作用を詳細に分析・把握することは重要であり，このような動きをすべて含む総合的なモデル（交通シミュレーション）が必要である．また，合流区間に適用可能な対策として，道路構造の変更による交通流の分離や案内標識・路面表示等のハード面による改良，上に示した事前の「情報提供」「危険の警告」「運転補助」等の先端的な ITS 技術の利用によるソフト面での改良があるが，この政策の効果を定量的に評価する方法としても，交通シミュレーションが必要である．

交通シミュレーションは，これまでの評価ツールとは違って交通状態の変化を動的に分析することができるため，きめ細かな政策評価を行うことが可能である．また，結果を視覚的に表現できるので，評価の結果を誰にでも分かりやすく伝えることができ，住民参加型の交通計画等への活用も広がっている．一般的に，ミクロレベルで交通の流れを表現することができるミクロ交通シミュレーションモデルは，様々な交通管理や統制などに反応して交通流がどのように変化するかを分析するために適用されてきた．そのように非常に有用な交通シミュレーションではあるが，これまでは詳細な車両挙動に対する情報を含む交通データセットの取得が技術的に困難であったため，ミクロな交通指標での再現性の検証は少なく，特に複雑な挙動が予想される合流部では行われていない．近年，情報処理技術が進展し，ビデオ画像から車

両走行軌跡データを抽出することは可能となっており、その車両軌跡データを用いることで車両一台一台の複雑な挙動の把握が可能となる。また、詳細な交通データでミクロ交通流モデルの構築や実用性に関する検証が、複雑な交通現象の再現性向上に寄与すると考えられる。

本研究では、以上のような背景を踏まえ、ビデオ画像から時系列的な車両挙動に対する軌跡データを抽出して、合流区間を含む全区間（直線区間、カーブ区間、合流区間）に於ける合流挙動に対してミクロな観点で車両の動きのモデルを構築した。特に、合流区間での現れるすべての動き、すなわち横の動きと縦の動きに対して皆表現できる合流挙動のモデルを構築した。この時、運転者の行動（追従行動、車線変更、ギャップ選択行動など）のうち、最も基本的な行動である車両追従行動に注目して、一つの前方車両に応じて追従する単独追従挙動と複数の前方車両に応じて追従する多重追従挙動に対して分析した。ここで、実際に運転者が走行する時の車両挙動は周辺道路環境及び交通特性によって多様に現れる。これは、運転者が走行するうち、等しい行動や規則性を持って走行するのではなく、周辺道路環境や交通特性によって、多様に応じる‘車両挙動の乱れ’が存在することを意味する。このような車両挙動の乱れ、すなわち運転者ごとに多様に現れる運転行動は、合流区間を含む一般区間に発生する交通コングリクト及び渋滞を解決できる重要な糸口になることができる。このような‘運転者の多様性’は交通問題に重要な鍵を提供できることにかかわらず、今までの車両挙動に関する研究のうち、運転者の多様性を考慮した研究は少ない。実際交通の特性を最大に反映して、多様な車両挙動を示すため、本研究では一つ一つ運転者（車両）ごとに車両追従挙動モデルを構築して、運転者の異質性を考慮して車両挙動を分析した。また、複雑な挙動が現れる合流区間に着目し、この区間に発生する追従しながら合流する挙動、すなわち追従合流挙動に対して分析した。このような車両追従行動や複雑な合流行動に対して、交通渋滞や事故原因となる運転者の行動を明確にできたら、それを抑制する施策への提案が可能になると期待できる。また、合流区間を含む一般区間での追従挙動及び追従合流挙動モデルの構築は、複雑な車両挙動の把握及び交通シミュレーションの再現性向上に必要不可欠であると考えられる。このような交通シミュレーションの再現によって、道路の効率性及び安全性の向上に寄与することと期待する。

1.2 本研究の構成

本研究は，上記のような研究の背景及び目的を踏まえて，図 1.1 に示すように全 7 章により構成される．

第 2 章では，本研究と関係のある既存研究の内容と課題について記述し，本研究の位置づけに対して論ずる．具体的には，まず，ビデオ画像処理技法に関する研究を紹介し，現状の課題を整理する．続いて，運転者の追従行動に関する既存研究を概説し，各追従モデルの関連研究の分析結果を通じて，研究の限界や課題について考察する．

第 3 章では，研究対象区間とビデオ画像データから，車両軌跡データを抽出する方法を記述する．具体的には，本研究で利用する詳細な車両データの抽出のための手動車両プロット取得システム，同一車両 ID 確認システム，最後に車両連結システムの開発について説明する．

第 4 章ではビデオ画像データから抽出した 15 分間の車両挙動データを利用して，都市高速道路での直線区間，カーブ区間，合流区間毎の運転者の単独追従挙動を分析する．特に，各区間での，運転者間の追従挙動特性の異質性及び運転行動に影響を及ぼす要因（時空間平均密度，走行車線，区間特性）に着目し，分析を行う．

第 5 章では，ビデオ画像データから抽出した車両挙動データを利用して，複数の前方車両に応じて走行する追従行動，すなわち多重追従行動に注目して分析を行う．これにより，単独追従モデルよりも多重追従モデルの方が実際の追従行動に対して説明力が高いことを検証する．また，多重追従行動に対する運転者間の異質性や，道路の幾何構造が多重追従行動に及ぼす影響についても考察を行う．

第 6 章では，ビデオ画像データから抽出した 15 分間の車両挙動データを用い，合流区間における合流挙動について論じる．特に本研究では，合流挙動のうち，流入ギャップが決定してから，実際にギャップに流入するまでの挙動に対して多重追従合流挙動モデルを援用することでモデル化を行う．さらに，構築したモデルを利用して，合流部での合流プロセスを再現するシミュレーションを構築しその再現性を検証する．

最後に第 7 章では，本研究で得られた知見及び結論を整理して，今後の研究の課題を提示する．

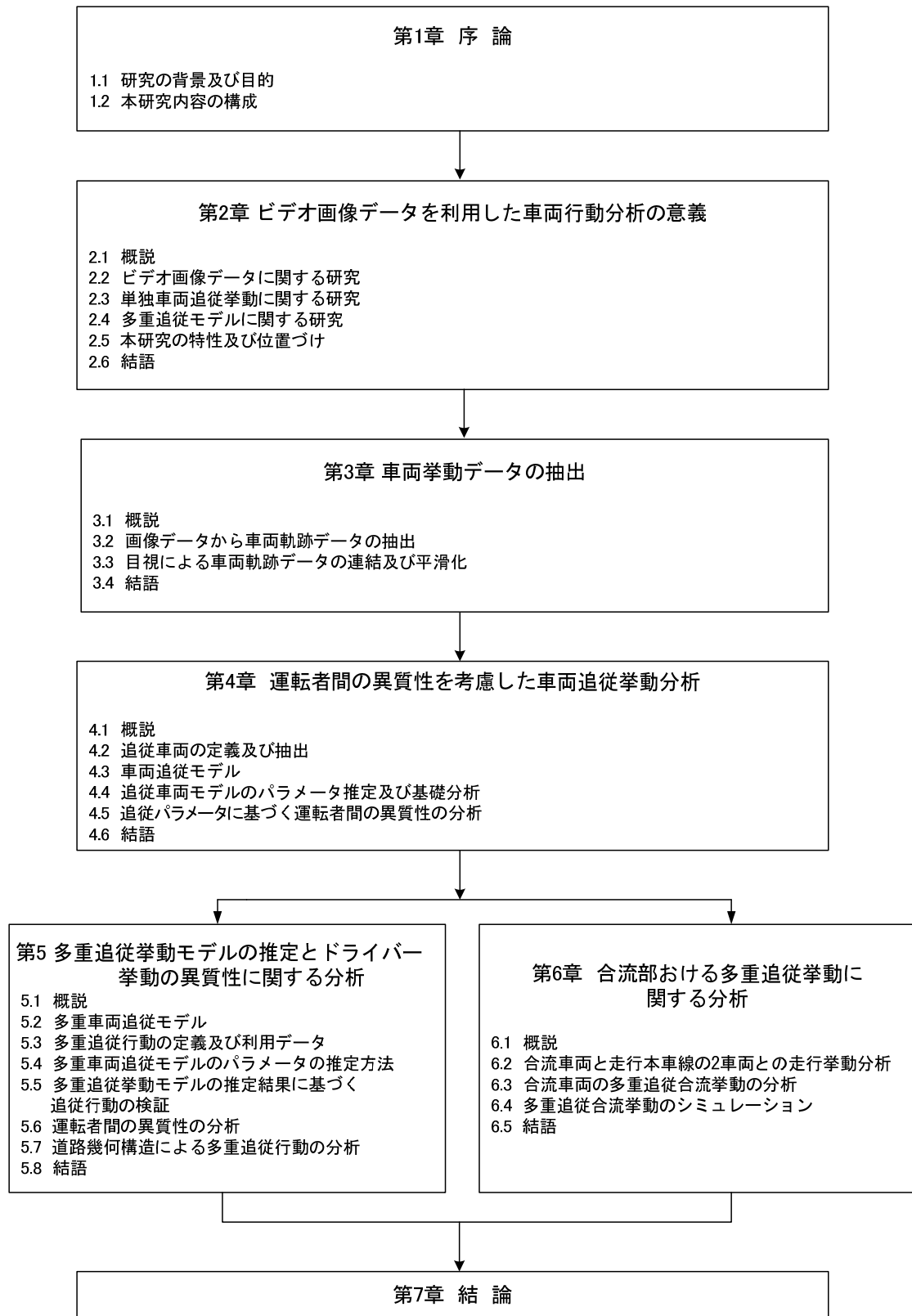


図 1.1 本研究の構成図

参考文献

- [1] 大口敬. “高速道路単路部渋滞発生解析－追従挙動モデルの整理と今後の展望－”, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp39-51, 2000.
- [2] 尾崎晴男. “自動車の追従走行挙動に関する研究, 土木計画学研究・講演集”, No.14(1), pp.375-380, 1991.
- [3] Brackston, M., and McDonald, M. “Car-following: A historical review”, *Transportation Research Part F2*, pp.181-196, 1999.
- [4] Chandler, R.E., Herman, R., and Montroll, E.W. “Traffic Dynamic: Studies in Car following”, *Operations Research*. Vol.6, pp.165-184, 1958.
- [5] Edie, L.C. “Car following and steady state theory for non-congested traffic”, *Operations Research*. Vol.9, pp.66-76, 1960.
- [6] Gazis, D.C., Herman, R. and Rothery, R.W. “Nonlinear follow the leader models of traffic flow”, *Operation Research*, Vol. 4, pp.545-567, 1961.
- [7] Gipps, P.G. “A model for the structure of Lane Changing Decisions”, *Transportation Research*, Vol. 20B, No.5, pp.403-414, 1961.
- [8] Herman, R., and Potts, R.B. “Single lane traffic theory and experiment”, In *Proceedings of Symposium on Theory of Traffic Flow*, Research Labs, General Motors. 1959, pp.147-157, New York: Elsevier.

第 2 章 ビデオ画像データを利用した 車両行動分析の意義

2.1 概要

本章では、ビデオ画像データを利用した車両追従行動分析について説明する。まず、ビデオ画像処理技法に関する研究と、ビデオ画像データを利用した車両行動分析に関する研究を紹介し、現状での研究課題について整理する。その研究課題に基づいて、ビデオ画像データを利用した車両行動分析の意義に対して記述する。特に、合流区間での運転者は一般区間に比べて運転負荷が多く、交通コンフリットや事故といった交通問題が起こりやすい。このような問題を解決するためには、まず、運転者の行動及び特性を理解することが必要である。また、合流区間での運転者は合流をするため非常に複雑な行動、すなわちギャップを選択する行動だけではなく、前方車両に追従する車両追従行動も伴って走行する。このような運転者の行動を理解するため、本研究では運転者の行動の中で、最も基本的な車両追従挙動に焦点を当てた。そこで、本章の 2.3 節と 2.4 節で単独車両追従モデルと多重車両追従モデルに対して紹介して、これらのモデルと係わった研究の分析結果を通じて、研究の限界や課題について考察した。最後に、先に示した研究からの課題を検討して、本研究の位置づけを記述する。

2.2 ビデオ画像データに関する研究

交通流の特性の解析に当たっては、ビデオ画像データの利用による vehicle tracking technologies（車両追跡技術）が有効である。Zhang and Forshaw (1997)はビデオ画像データを利用して動く車両の速度と動きの方向に対する測定方法を示したが、データを抽出する際に発生する費用の問題により車両データを収集することができなかった。現在の技術では、合理的な費用（データごと費用）での自動的な車両データの収集は難しいため、データごとの費用は抽出時に大きな障害となる。このため、ビデオ画像データから、正確性と合理性が落ちる車両データのサンプルの大きさをもたらす。また、ビデオ画像処理技術が車両データの測定において‘error’を持っているこ

とを示す研究もいくつか挙げられる。Coifman et al.(1998)は昼と夜間の風や照明によって発生する交通混雑や、車両の重複、カメラ震動、そしてカメラ間発生する長い影などの誤差によって、ビデオ画像処理技術に誤差が生じることを示した。また、ビデオ間の同一車両を連結する画像に対する処理が難しいということも示した。このような理由から、正確なビデオ画像処理技法やシステム開発に焦点を合わせた研究が増えている。Suzuki and Nakamura(2004)は車両検知及び車両番号の確認ができる簡単なビデオ画像処理システムを構築し、交差点で得たビデオ画像データを利用してシステムの評価を行った。Nonaka et al.(2004)は、また、都市高速道路における車両挙動データを取得するためのシステム開発を試みた。このシステムでは semi-automatic methodology を適用し、車両を先に手動で確認し、その後、画像処理技術を適用して自動的に車両の軌跡データを収集する。この方法を用いると大型車両とのオクルージョンによる error を抑え易いという長所を持っている。

近年、ビデオ画像処理技術の発展によって、ビデオ画像から得た詳細な車両データを利用して車両の動きの推定や証明が可能になった。これによってマクロな運転者の行動だけではなく、さらにミクロな観点での運転者の行動を理解することが可能となり、ビデオ画像データを利用して、車両挙動を評価・解析する研究も行われている。内山(1999)は高速道路の夜間工事での車線規制区間を対象として、画像データを用いて得られた車両軌跡データを用いて、「合流を開始する」と「合流を見送る」という2つの選択を2項選択ロジットモデルで表現している。また、Shimizu and Yamada (2000)はビデオ画像データを利用して運転者、車両挙動、そして周辺環境間の関係を見だし、合流挙動を分析しこれに基づいて micro-simulation model (ミクロシミュレーションモデル)を開発した。Shimizu et al.(2004)はビデオ画像データを利用して、高速道路合流区間での情報システムが運転者行動に及ぼす影響に対して分析した。また、渡辺ら(2005)は、高速道路のオンランプ合流部を対象に、画像データを利用して「直近のギャップに合流する」「追い越して1台先のギャップに合流する」という2項選択のロジットモデルを構築し、さらに合流車両の加速度推定モデルも提案している。Yet(2005)はビデオ画像データを利用して、雨が運転者の加・減速の行動に及ぼす影響を分析した。山崎ら(2006)は、一般国道の合流部について、「直近のギャップに流入する」と「次(後方)のギャップに流入する」という2項選択のロジットモデルで合流ギャップ選択モデルを構築している。J.Wu(2007)は11個のビデオカメラから得たデータを利用して、ramp metering (ランプメータリング)が運転者の合流行動に及ぼす影響を分析した。

また、ビデオ画像データから抽出した車両走行データを適用し、車両間のコンフリクトを分析した研究も行われている。若林 et al.(2002)はビデオ画像データを交通コンフリクト分析に適用することを試みた。Uno et al.(2003)はビデオ画像データから抽出した車両データを利用して、weaving section(織込部)でコンフリクトが観測される車両行動に対してミクロな観点で分析し、新しいコンフリクト指標(PICUD)を提示した。

最近ビデオ画像技法の発展によって、精緻なビデオ画像データを利用して車両の動きを推定及び証明することができるので、前に記述した研究よりもっとミクロな観点での運転者の行動(e.g. 追従行動, 追い越し行動, 車線変更行動, 合流行動など)に関する分析が可能になった。上述した研究の大部分は、ビデオ画像データを利用して分析区間での車両挙動に及ぼす影響を分析した研究、または、合流区間でのギャップ選択行動に対して、‘ギャップを選択する、選択しない’という簡単な選択に関する運転者合流行動分析に焦点が合わせられている。また、このような分析に基づいて多くのミクロシミュレーションモデル(Zearen and Nemeth, 1990; Mousa et al., 1992, etc)が開発されたが、それらのモデルは非常に簡単であり、運転者の異質性を考慮しなく一つのモデルで運転者の行動を表現ので、実際に運転行動を説明するのに不十分である。実際に一般区間だけでなく合流区間での運転者は、非常に複雑な行動を取りながら走行している。特に、合流区間での合流車両は、ギャップを選択する行動だけでなく、前方車両に追従することが求められる。さらに、運転者挙動特性は運転者ごとに異なると考えられるが、これを考慮した運転者行動分析に関する研究はほとんどない。また、合流区間での運転者の合流行動に関する研究で、ギャップ選択行動以外の他の行動に関する研究はほとんど見られない。そこで、本研究ではビデオ画像データから得た精緻な車両走行データを利用して、一般区間及び合流区間における最も基本的な運転者の行動である、追従挙動に対して分析する。

2.3 単独車両追従挙動に関する研究

車両の追従挙動は、運転者の行動に関する研究分野の一つとして、1950年代から交通工学分野で取り上げられ、研究されている。車両追従は基本的に、同一車線における直前の前方車両との関係を説明するものであるが、車両追従モデルそのものがミクロシミュレーションモデルでの主要モデルといえる。また、車両追従モデルは個人運転者レベルとさらにミクロなスケールで、運転者行動に対する現象全般における相互作用を理解するために適用されている(Krauss, 1977)。近年、このような車両追従モデルは、ITSのシス

テムである AVCSS(advanced vehicle control and safety systems)の土台を形成する行動モデルとして、ますます重要となっている。また、運転者の認識の誤謬や認知反応時間に起因して発生しうる潜在的な危険挙動を回避するために運転動作を補助する ACC(autonomous cruise control)システムにおいても、追従挙動の把握は重要な役目を果たす。

運転者の追従行動を表す車両追従モデルは大きく the single car following model (単独車両追従モデル) と the multi-anticipative car following model (多重車両追従モデル)に分けることができる。基本的に単独車両追従モデルは、同一車線の直前の前方車両を考慮するが、多重車両追従モデルでの追従車両は同一車線の複数の前方車両の行動に応じると仮定する。Brackstone et al.(1999)は単独車両追従モデルを大きく 5 つのモデル、すなわち Gazis-Herman-Rothery(GHR) model(=GM model), Safety distance or collision avoidance model(CA model), Linear (Helly)model, Psychophysical or action point model(AP), Fuzzy logic-based model に分類した。本研究ではこれに Optimum velocity model(Bando model)と Trajectory follow model(Newell model)を加えて単独車両追従モデルについて概要を整理する。

2.3.1 Gazis-Herman-Rothery model (GM model)

GM モデルは車両追従モデルの中で最も有名なモデルの一つであり、General motors research group の Gazis, Herman, Rothery(1958)によって開発された。GM モデルの構造式は式 2.1 のようであり、追従車両の速度、前方車両との相対速度と相対距離を利用して、前方車両と追従車両の加速度間の追従関係を説明する。このモデルでは、一定反応時間(time lag, T)後、追従車両の加速度(\ddot{x}_{n+1})は追従車の速度(\dot{x}_{n+1})と前方車両との相対速度($\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}$)には比例するが、相対距離($x_n - x_{n+1}$)とは反比例する非線形的な関係を持っている。

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \alpha \frac{\{\dot{x}_{n+1}(t)\}^m}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} \cdot [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad \text{式 2.1}$$

ここで、

$\ddot{x}_{n+1}(t+T)$: : 追従車両の加速度 (m/s^2), $\dot{x}_n(t)$: : 前方車両の速度 (m/s),
 $\dot{x}_{n+1}(t)$: : 追従車両の速度 (m/s), $x_n(t)$: : 前方車両の位置 (m),
 $x_{n+1}(t)$: : 追従車両の位置 (m), α, m, l : : 推定パラメータ, T : 反応時間 (sec)
 である。

GM モデルに関する研究は、推定パラメータである m と l の最適な組み合わせを求めることに焦点を当てた研究が大部分であり、それらの研究で得られたパラメータの多様な組み合わせをまとめると、表 2.1 のようになる。

表 2.1 GM モデルのパラメータ m と l の組み合わせの推定結果

GM model に対する研究	パラメータ m	パラメータ l
Chandler et al.(1958)	0	1
Kometani and Sasaki(1959)	0	1
Gazis, Herman and Potts(1959)	0	1
Herman and Potts(1959)	0	1
Helly(1959)	1	1
Gazis et al.(1961)	0-2	1-2
May and Keller(1967)	0.8	2.8
Heyes and Ashworth(1972)	-0.8	1.2
Hoefs(1972)	1.5/0.2/0.6	0.9/0.9/3.2
Treiterer and Myers(1974)	0.7/0.2	2.5/1.6
Ceder and May(1976)	0.6	2.4
Aron(1988)	2.5/2.7/2.5	0.7/0.3/0.1
Ozaki(1993)	0.9/-0.2	1/0.2

このように、パラメータ m , l が多様な組み合わせを持つ理由としては、まず、追従車両の行動は研究対象区間の交通流状態に影響を受け、その反応が多様に現れること (Rockwell and Treiterer, 1966) が考えられる。2 つ目の理由は、多くの経験的な研究の結果として、研究対象区間の速度が低い場合に追従車両は、前方車両の刺激に対してあまり応じて走行しないことで現われた (Brackstone et al., 1999)。

基本的に GM モデルは、追従車両と前方車両との関係を刺激として追従車両が反応時間 T 後に加速度を調整するという仮定の下で追従車両の行動を説明するモデルである。このモデルの特徴は構造が比較的簡単であり、推定パラメータの物理的な意味の解釈が比較的容易なことである。一方、モデルが持つ構造的な特性のため、相対速度 ($\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}$) が 0 になれば、相対距離にかかわらず追従車両の加速度 (\ddot{x}_{n+1}) の値も 0 となる。また、追従車両の加速度 (\ddot{x}_{n+1}) の減速 (-)・加速 (+) の可否、すなわち加速度の符号の正負は相対速度 ($\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}$) の符号によって決まる。そのため、GM モデルでの追従車両の加減速の反応は相対速度の符号や値によって対称的な値を持つようになる。よって、GM モデルで追従行動分析する際には、相対距離や追従車両の速度

による追従車両の行動を十分には表現できない可能性があると考えられる。

2.3.2 Safety distance or collision avoidance models(CA models)

このモデルの初期モデルは Kometani and Sasaki(1959)によって提案されたものである。先に説明した通り、GM モデルでは刺激-反応形態の関数として追従関係を説明したが、このモデルでの運転者はこれから起こる事に対して予測することができないという仮定の下、車両との衝突を避けるために具体的に安全な追従距離(a safety following distance)を捜すということに焦点を当てて追従関係を提示した。Kometani and Sasaki(1959)が提示した Safety distance or collision avoidance models の構造式は式 2.2 のようになる。

$$\Delta x(t) = \alpha v_n^2(t) + \beta_1 v_{n+1}^2(t+T) + \beta_2 v_{n+1}(t+T) + b_0 \quad \text{式 2.2}$$

ここで

$\Delta x(t)$: 安全な追従距離(m), $v_n(t)$: n 番目の車両 (前方車両) の速度(m/s), $v_{n+1}(t+T)$: $n+1$ 番目の車両 (追従車両) の速度(m/s), α, β_1, β_2 : 係数, b_0 : 定数, T : 反応時間である。

このモデルは Gipps(1981)によって発展された。すなわち、Kometani and Sasaki モデルが距離の概念で前方車両との追従関係を表現したのに対し、Gipps モデル(1981)は Kometani and Sasaki モデルから除かれたさまざまな緩和要素(mitigating factors)を考慮して、距離ではなく速度の概念で追従関係を説明した。すなわち、既存の Kometani and Sasaki モデルで車両の制限能力 (最大及び最小加速率と減速率) に対する要素を追加的に含んだモデルを提案した。このモデルで重要な仮定は ‘追従車両の運転者は加速度制約(a acceleration constraints)と安全制約(a safety constraints)の中で、自分の実際速度を最大化する’ というものである。加速度制約は車両性能に起因する物理的な制限と運転者の楽さに対する要求から影響を受けると仮定し、安全制約は前方車両と追従車両の最大減速率を考慮して追従車両の速度が前方車両によってどれだけ影響を受けるかを説明する。このような 2 種の仮定に基づいて、Gipps モデルでは式 2.3 を利用して追従車両の運転者に対する安全速度を算出する。

$$v_n(t+T) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2.5a_n T \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n^{\max}}\right) \left(0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n^{\max}}\right)^{\frac{1}{2}} \\ b_n T + \sqrt{b_n^2 T^2 - b_n \left(2(x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t))v_n(t)T - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right)} \end{array} \right\} \quad \text{式 2.3}$$

ここで,

- $v_n(t+T)$: 一定時間(T)以後の n 番目の車両 (追従車両) の (安全) 速度(m/s)
- $v_n(t)$: n 番目の車両 (追従車両) の速度(m/s)
- a_n : n 番目の車両 (追従車両) の最大加速度(m/s²)
- T : 反応時間(sec)
- V_n^{\max} : n 番目の車両 (追従車両) の最大速度(m/s)
- b_n : n 番目の車両 (追従車両) の最大減速率(m/s²)
- \hat{b} : n-1 番目の車両 (前方車両) の最大減速率(m/s²)
- $x_{n-1}(t)$: n-1 番目の車両 (前方車両) の位置(m)
- $x_n(t)$: n 番目の車両 (追従車両) の位置(m)
- s_{n-1} : n-1 番目の車両 (前方車両) の長さ(m)

である.

Gipps(1981)によって開発された CA モデルは, シミュレーションモデルに広く利用されている. 具体的には, イギリスの UK DOT's SISEM model(McMondal, Brackstone & Jeffery, 1994), イタリアの SPEACS model as a part of PROMETHEUS software, フランスの Broquea et al.(1991), アメリカの INTRAS and CARSIM(e.g. Benekohal et al.(1989)), そして日本の Kumamoto et al.(1995) によって利用された. また, Ranjitkar(1999)は CA モデルにより chaotic behaviour を表現した. このモデルの魅力的な点は, 追従車両の加減速の変換を通じて, 実際の交通状況で現れる運転者行動をよく表現しており, 常識的な仮定でパラメータを推定するという点である. このような長所を持つにもかかわらず, このモデルは加速度制約と安全制約間の追従車両の速度の変換は, 安全制約項により運転者が最大減速率で減速するという仮定が置かれている. したがって, 実際に追従車両より前方車両の減速率が大きい場合や, 車線を離脱した場合, また, 2つの車両間のギャップに新しい車両が入って来た場合の追従車両の行動を説明することができない. また, 追従車両は実在的に車両に対するさまざまな要素を考慮し, 前方車両による情報 (preview information)によって, 前方車両との安全距離 (速度) を考慮する. しかし, このような ‘安全距離(the safe headway)’ の概念の手始めポイント

がまだ明確には証明されていなかったという点で, 実在的な追従車両との関係を説明することができない部分もあると考えられる.

2.3.3 Linear model(Helly model)

Linear モデルは, Chandler et al.(1959)も提案したが, 一般的には Helly(1959)によるモデルを意味する. Helly モデル(1959)は前方車両との相対速度と相対距離を刺激にして, 一定反応時間(time lag)後, 追従車両の加速度を線形関係で表現する追従モデルである. このモデルは現実的な追従行動を表現するために希望(車間)距離(Desired distance)を導入して, 希望(車間)距離と前方車両との相対距離の差に応じて追従車両は加速度を調整するとしたモデルであり, 式 2.4 のように記述される.

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = C_1[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + C_2[x_n(t) - x_{n+1}(t) - D_n] \quad \text{式 2.4}$$

ここで,

$\ddot{x}_{n+1}(t+T)$: 追従車両の加速度 (m/s^2), $\dot{x}_n(t)$: 前方車両の速度 (m/s),

$\dot{x}_{n+1}(t)$: 追従車両の速度 (m/s), $x_n(t)$: 前方車両の位置 (m),

$x_{n+1}(t)$: 追従車両の位置 (m), D_n : 希望距離(Desired distance, m),

C_1, C_2 : 推定パラメータ, T : 反応時間(sec)

である.

パラメータ C_1, C_2 に対するの最適な組み合わせの推定及び検証に関して, 多くの研究がなされてきた. それらの研究によって推定されたパラメータの組み合わせは表 2.2 の通りである. Hanken and Rockwell(1967, 1968)は linear model を利用した追従挙動に対してミクロなシミュレーションした結果, 線形モデルが追従車両の行動を適切に表現することを示した. また, Burnham and Bekey et al.(1977)は, 線形モデルが現実的な車両の軌跡をよく描いており, 追従車両の減速と加速の間に穏やかな転換が見られることを示した.

表 2.2 ‘Helly’ モデルに対する最適パラメータの組み合わせの研究結果

Source	$C_1(\Delta v)$	$C_2(\Delta x)$
Helly(1959)	0.5	0.125
Hanken and Roackwell(1967)	0.5	0.06
Bekey, Burnham and Seo(1977)	0.5	1.64
Aron(1988) (dcn/ss/can)	0.36/1.1/0.29	0.03/0.03/0.03
Xing(1995)	0.5	0.05

Dcn/can : deceleration/acceleration; ss : steady state.

このモデルの中で、Xing(1995)は Helly モデルに GM モデルを部分的に結合させて、式 2.5 のようなモデルを提案した。Xing(1995)が開発したモデルの一番目の項は GM モデルと似た‘一般的な走行(standard driving)’項であり、二番目の項は加速度に対する項、三番目の項は勾配の効果に関する項、最後の四番目の項は一番目の項に対するパラメータとして自由流の状態を使うパラメータである。このモデルは Koshi(1981)が開発したモデルと構造が似ており、他のモデルに比べて勾配の影響、及び自由流の状態での希望速度を考慮しており、観察された車両軌跡をよく表現している。しかし、Helly モデルに比べて、希望速度や勾配など、推定しなければならないパラメータが多く、構造式が複雑であるから、推定パラメータの物理的な意味解釈が比較的難しい。また、勾配を考慮する際、勾配がある区間に対する希望速度の推定が難しいため、前方車両と追従車両との関係をよく表現できない部分もあると考えられる。

$$a = \alpha \frac{\Delta v(t-T)}{\Delta x(t-T)^l} + \beta \frac{\Delta x(t-T) - D_n(v(t-T))}{\Delta x(t-T)^m} - \gamma \sin\theta + \lambda(v_{des} - v_n) \quad \text{式 2.5}$$

ここで、

a : 追従車両の最大加速度(m/s^2), $\Delta v(t-T)$: 前方車両との相対速度(m/s),
 $\Delta x(t-T)$: 前方車両との相対距離(m), $D_n(v(t-T))$: 追従車両の希望距離(m),
 T : 反応時間(sec), v_{des} : 希望速度(m/s), v_n : 追従車両の速度(m/s),
 $\sin\theta$: 勾配, $\alpha, \beta, \gamma, \lambda$: 推定パラメータ
 である。

先に示した通り、GM モデルと Linear モデル(Helly model)は構造的に異なる点が大きく 2 つ存在する。1 つ目は、Linear モデルは GM モデルよりも相対速度の感度パラメータ (パラメータ C_1) の値が多様であり、相対距離に対する感度パラメータ (パラメータ C_2) も GM モデルに比べて、4~10 倍程度低い結果となっている。また、相対距離の項が相対速度の項から分離しているため、前方車両との希望距離の関係を抽出できる。Linear モデルは、GM モデルに比べて構造式の形態や得られた推定の程度が高いので、車両軌跡を適切に再現することが証明された(Brackstone, 1999)。その井法で、Helly モデルは速度の低い交通状況では追従関係をよく表現できず、観測されたよりも車尾間隔の値が大きくなる傾向が指摘されている(Aron, 1988)。

2.3.4 Fuzzy Logic-based Model

車両追従モデルでの fuzzy logic の理論の使用は、車両追従モデルの開発に対する次のステップとして運転者行動を正確に描くために試された。Fuzzy logic の理論を利用したモデルは入力データを ‘fuzzy sets (ファジィセット)’ に分類して適用した。このモデルに対する初期の試みとして、Kikuchi and Chakroborty(1992)は正確な運転者行動を表現するため、相対速度、相対距離、そして前方車両の加速度(Δv , Δx , a_{n-1})入力データとして、fuzzy logic の理論を利用して GM モデルを ‘(fuzzify) 曖昧化’ した。その際、次の 2 つの仮定に基づいてモデルを開発した。

- 1 番目の仮定：‘もし、前方車両が加速したら、追従車両は前方車両と一緒に加速する’
- 2 番目の仮定：‘前方車両が減速する、あるいは相対距離が短ければ、追従車両は減速する、または、長い車尾間隔を取ろうとする’

上で示した 2 つの仮定による the fuzzy inference は次の式 2.6 のようになる。

$$\text{If } \Delta x = \text{ADEQUATE, then } a_{n,i} = (\Delta v_i + a_{n-1,i}T)/\gamma \quad \text{式 2.6}$$

ここで、

Δx : 前方車両との相対距離(m), $a_{n,i}$: 追従車両の加速度(m/s^2),

Δv_i : 前方車両の速度(m/s), $a_{n-1,i}$: 前方車両の加速度(m/s^2),

T : 反応時間(sec), γ : 定数 2.5

である。

もし、‘If $\Delta x \neq \text{ADEQUATE}$ ’ の場合には ADEQUATE からの偏差程度によって、ファジィの the membership function によって追従車両の反応が変更される。2 番目の仮定で提示したように短い相対距離によって、追従車両の加速度($a_{n,i}$)は -0.3m/s まで減少して、長い相対距離でも同様に追従車両が同じだけ加速すると仮定した。したがって、‘If $\Delta x \neq \text{ADEQUATE}$ ’ になる場合、追従車両の加速度に対するモデルは式 2.7 のような構造を持つようになる。

$$a_{n,i} = (\Delta v_i + a_{n-1,i}T)/\gamma + \beta_{\Delta x} \quad \text{式 2.7}$$

ここで、 β は相対距離に対するパラメータを表す。

Fuzzy Logic-based Model は、一般的に予想される加速度変化の及ぼす影響をよく表しているにもかかわらず、元々の GM モデルの分析結果と比べた結果、Fuzzy Logic-based Model での追従車両は減速率と最終速度によって車尾間隔が異なることを証明した。また、最終の追従距離は初期の推定距離や速度と関係なく、ただ最終速度にのみ影響を受けることを示した(Kikuchi and Chakroborty, 1992)。また、Helly model でのパラメータ推定結果のように、相対距離と追従車両の加速度間の相対的な依存関係が小さい結果となった。よって、このモデルでの相対距離を利用して追従関係を表現することは非現実的だという事実が示される(Brackstone, 1999)。

2.3.5 Psychophysical or action point model(AP)

このモデルは Michaels(1963)によって提示されたが、基本的に‘運転者は直観的に見える前方車両の大きさの変化によって前方車両に追従する’という概念を持っている。すなわち、後方車両は前方車両が見える the visual angle(θ)の変化による前方車両との相対速度によって、前方車両に追従するという概念である。追従車両が前方車両に対して認知する the visual angle (視角) (θ)の基本値は $d/dt(\sim \Delta v / \Delta x^2) \sim 6 \times 10^{-4}$ とされている。この基本値を超過すれば相対距離が小さくなるので、運転者は減速を選択し、反対に基本値を下回って相対距離が大きくなれば、運転者は加速を選択する。このような概念に基づくと、追従車両はどの相対距離と相対速度のどの変化にでも、前方車両をすべて認知することができるということが分かる。Visual angle (視角) と追従車両の加速度間の関係は次式 2.8 の通りである。

$$a_n(t) = C \left(-\frac{d\theta}{dt} \right) \quad \text{式 2.8}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -W \left(\frac{\Delta v}{\Delta x^2} \right) \quad \rightarrow \quad a_n(t) = CW \left(\frac{\Delta v}{\Delta x^2} \right)$$

ここで、

$a_{n,i}$: : 追従車両の加速度(m/s^2), θ :視角, Δx : 前方車両との相対距離(m),
 Δv_i : : 前方車両との相対速度(m/s), C, W : パラメータ
 である。

式 2.8 より、追従車両は $d\theta/dt$ の値が正(+)であれば減速して、負(-)であれば加速する。このモデルは $\alpha = CW$, $m=0$ であり、 $l=2$ となる時の GM モデルと似ている。1970 年代の初め、Evans and Rothery(1973, 1976)は Michaels が示した‘認知’に対する基本値を定量化するために実験を行った。そこで、

実験車両の運転者の追従開始時，終了時，決まった時間に前方車両とのギャップと **positive, negative** そして **zero**（正，負，ゼロ）の相対速度を測定した．分析の結果，相対距離が大きい時，相対速度の値はほぼ 0 となった．また，相対距離が小さいほど，追従車両の相対速度は正(+)の値をとり，反対に，相対距離が大きいほど負(-)の値をとる傾向があることが分かる．ここから，**Evans and Rothery(1973, 1976)**は‘追従車両は相対距離の変化によって，前方車両との相対速度を調節する’ことを確認した．また，**Leutzbach & Wiedemann(1986)**は IfV Karlsruhe により，シミュレーションに認知概念を適用した研究を行い始めた（他の類似のモデルは **Burnham & Bekey, 1976; Lee, 1976, and more recently by Kumamoto et. al., 1995**）．このアプローチは現在，the **MISSION model**(used in the **CECs DROVE1 programme**, **Wiedemann & Reiter, 1992**), ドイツでの the related **AS model** used in the **PROMETHEUS** and fourth frame work programme(**Benz, 1994**), フランスでの along with recent advances being made by **Frizsche(1994)**, そしてイギリスでの incorporation into **PARAMICS-CM model** by **Cameron(1995)**で利用されている．このモデルは運転者の行動を考慮したモデルで，収容できる **simulated behaviour** を提示することができるという長所を持っている．一方で，モデルの妥当性を証明するのが難しい，結論を明確に下しにくい，運転者ひとりひとりの要素と基本値に対する推定があまりよく成り立たない，などの短所を持っている (**Brackstone, 1999**)．

2.3.6 Optimum Velocity model(Bando model)

Optimal velocity model は **Bando et al.(1995)**によって初めて提案された．このモデルでは，追従車両は自車の通行速度と可能な最適速度との差に基づいて，加速や減速を選択するという概念を持っている．ここで，最適速度 ($V(\Delta x_n)$)は，前方車両との相対距離の関数で規定される．すなわち，**Optimal velocity model**での追従車両は，自車速度と，前方車両との相対距離から算出する最適速度との相対速度で，式 2.9 のように車両の **car following process**（車両追従プロセス）を説明する．式 2.9 で追従車両の速度 (v_n)が最適速度 ($V(\Delta x_n)$)より小さければ， n 番目の追従車両は加速し，反対に，大きくなる状況では追従車両は減速を選択する．

$$a_n = \alpha\{V(\Delta x_n) - v_n(t)\} \quad \text{式 2.9}$$

ここで,

a_n : : 追従車両の加速度(m/s^2),

$V(\Delta x_n)$: : 追従車両の相対距離による可能な最適速度(m/s),

Δx : 前方車両との相対距離(m), v_n : : 追従車両の速度(m/s),

A : 相対速度に対する運転者の敏感度を表すパラメータである.

最適速度($V(\Delta x_n)$)の算定にあたって, Bando et al.(1995)は式 2.10 の関数を用いている. また, パラメータ α は相対速度に対する運転者の感度を表す係数として, 各車両の速度が最適速度にどれだけ早く収束するかを表現するものであり, その値は常に正(+)値を取る.

$$V(\Delta x) = \tanh(\Delta x(t) - 2) + \tanh 2, \text{ in here } \Delta x(t) = x_{n+1} - x_n \quad \text{式 2.10}$$

最適速度の概念を利用した **Optimal velocity model** で追従車両の行動を分析する際には, 追従車両の最適速度が必要である. しかし, 道路幾何構造が一定でない場合, 最適速度は道路幾何構造の与件によって変化する. また, 分析区間が短い場合は, 最適速度を得難い. よって, 一貫的な最適速度の算定は難しいと判断できるため, このモデルを利用して分析する場合には追従車両の行動をよく表現することができない可能性があると考えられる.

2.3.7 Trajectory following model

このモデルでは, 後方車両は前方車両の車両軌跡に, 追従して走行するという概念を基本とする. Castello(1996)は後方車両の運転者は式 2.11 のように, 前方車両の速度軌跡に合わせるように追従すると提案した. このモデルの構造式は以下のようになる.

$$v_n(t + T) = v_{n-1}(t) \quad \text{式 2.11}$$

ここで,

v_n : : 追従車両の速度(m/s), v_{n-1} : 前方車両の速度(m/s), T : 反応時間(sec)である.

このモデルは Newell(2002)によってさらに発展して有名になったが, 彼は同質的な交通条件での単純な車両追従モデルを示した. このモデルは, 車両の **time space trajectory** は必然的に前方車両と等しいという単純なルールに

基づいている．図 2.1(a)のように前方車両(n-1)と追従車両(n)との相対距離間隔 $x_{n-1}(t) - x_n(t)$ は時間によって変化するが，同一の交通条件下で前方車両が一定速度で走行する場合，相対距離(S_n)は一定値をとる．しかし，前方車両が異なると，相対距離(S_n)は前方車両の速度に依存するため，その値は変わる．ここでもし，前方車両が一定速度で走行している途中に急に速度を変更したら，実際的前方車両の軌跡は図 2.1(b)の点線のようなになる．これを求めやすくするため，**Piecewise linear extrapolations** でこの値を推定し，前方車両の以前の速度と新しい速度による軌跡の実線は互いに交差すると仮定すれば，実際の車両軌跡は実線と近接する．したがって，2つの実線が交差する地点での相対距離と時間は d_n と T_n に変更される．よって，追従車両の the piecewise linear trajectory $x_n(t)$ は，前方車両 $x_{n-1}(t)$ による相対距離 d_n と時間 T_n によって，式 2.12 のように表すことができる．

$$x_n(t + T_n) = x_{n-1}(t) - d_n \quad \text{式 2.12}$$

ここで，

$x_n(t + T_n)$: : 追従車両軌跡， $x_{n-1}(t)$: : 前方車両軌跡，

τ_n : 前方車両の軌跡変化に対する反応時間，

d_n : 反応時間における前方車両と追従車両との相対距離である．

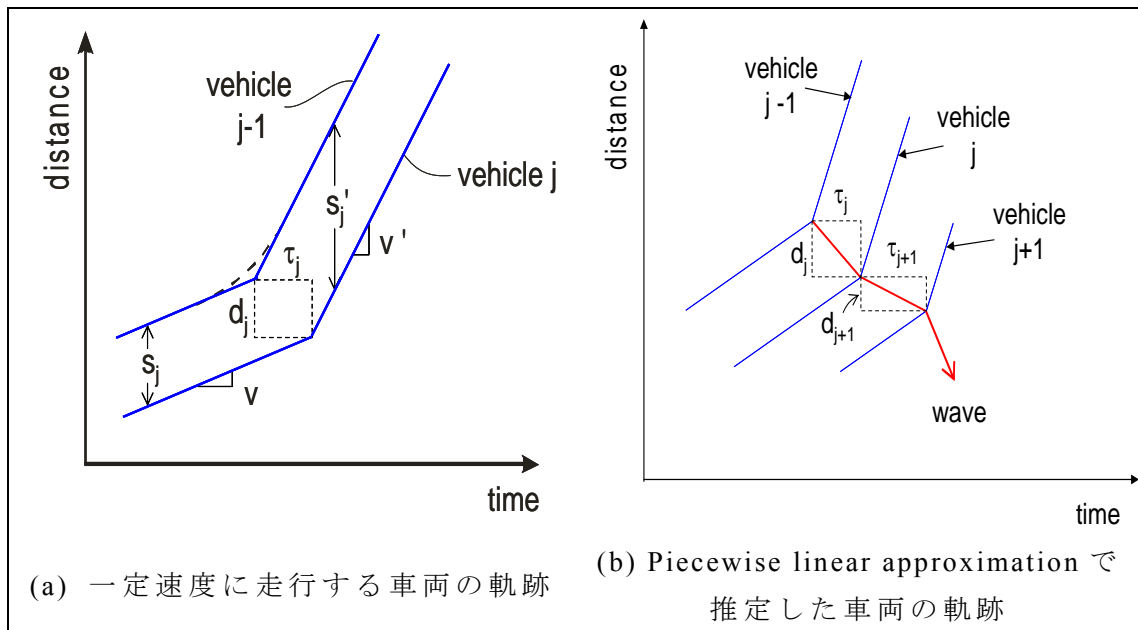


図 2.1 Trajectory following model で，現われる車両軌跡

このモデルは、単純なルールで簡単に前方車両と追従車両間の関係を表現している。しかし、同質的な交通条件を持つ車両に対して仮定した追従関係なので、非同質的な状態、すなわち他の道路幾何構造や交通流の特性による影響を反映した運転者の追従行動を表すことができないという短所を持っている。よって、多様な運転者の追従行動を表せないという大きな制約を持っている。

2.4 多重追従モデルに関する研究

追従モデルは半世紀以上の間、追従車両の運転者が交通流に対してどう自分の速度を調節する過程を説明したモデルであった(Pipe, 1953)。現在までの車両追従モデルに関する研究は、大きく **Single car following model**（単独車両追従モデル）と **Multi-anticipative car following model**（多重車両追従モデル）に分類できる。基本的に単独車両追従モデルは追従車両が安全な走行をするために自車両を基準として直前の前方車両のみを考慮して追従行動を説明するモデルであるのに対し、多重車両追従モデルでの追従運転者は、直前の前方車両だけではなく、複数の前方車両の行動に応じて追従行動を決定する。したがって、多重車両追従モデルは単独車両追従モデルから拡張された概念を持った車両追従モデルといえる。

多重車両追従モデルは、さらに現実的に他の車両が追従行動に及ぼす影響を明らかにするために提示されてきた(Hoogendoorn et al., 2006)。このような多重車両追従モデルとして、本研究では **Lenz model** と **Bexelius model**、そして **Generalized Helly model** について整理する。

2.4.1 Lenz モデル(Lenz model)

Lenz et al.(1999)のモデルは、最適速度を利用して追従関係を説明する単独車両追従モデルである **Bando model**(Bando et al.,1995)の概念を拡張させた多重車両追従モデルである。Lenz et al. (1999)は基本的に **Bando model** を基本に、追従車両の運転者が多重の前方車両の行動に反応して追従するモデルを開発した。すなわち、‘追従車両の運転者は自分の速度($v(t)$)と可能な最適速度($V(t)$)間の差を基に、加速あるいは減速の行動を決定する’という概念に基づいている。よって、追従車両の加速また減速は次の式 2.13 のように表現される。

$$a(t) = \sum_{j=1}^m K_j \left\{ V\left(\frac{\Delta x_j(t)}{j}\right) - v(t) \right\} \quad \text{式 2.13}$$

ここで、最適速度 $V(t)$ は、前方車両との相対距離に関して追従車両の速度を説明する関数で、 $\Delta x_j(t)$ は j 番目の前方車両との相対距離、そして $v(t)$ は時間 t での追従車両の速度を意味する。ここで、パラメータ K_j は j 番目の前方車両に対する敏感度の係数として、追従車両の速度が最適速度とは異なる時、各車両の速度が最適速度にどれだけ早く収束するかを表現するものである。したがって、常に正の値を持つ。

このモデルは **Bando model** の拡張モデルなので、**Bando model** の持つ短所が **Lenz model** にも同様にあてはまる。すなわち、最適速度の概念を利用した **Optimal velocity model** は追従車両の行動を分析する際、**Lenz model** においても追従車両の最適速度が必要となる。しかし、道路幾何構造が一定でない場合、最適速度は道路の幾何構造によって変化しやすく、短い区間での最適速度を求めることは比較的難しい。したがって、一貫的な最適速度の算定は難しく、このモデルを利用して分析する場合、追従車両の行動をよく表現することができない部分があると考えられる。

2.4.2 Bexelius model

Bexelius model(1968)は、追従車両が複数の前方車両との相対速度に応じて走行することを基本概念としており、前方車両との相対速度によって追従車両の行動が説明される。このモデルは **Chandler, Hermand and Montroll**(1958)が提示したモデルの拡張概念として、式 2.14 のように表される。

$$a_i(t+T) = \sum_{j=1}^m \alpha_j (v_{i-j}(t) - v_i(t)) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \Delta v_i^{(j)}(t) \quad \text{式 2.14}$$

ここで、

$a_i(t+T)$: 一定時間(T)後の追従車両の加速度 (m/s^2)

$\alpha_i^{(j)}$: 前方車両 j (for $j=1, \dots, m$)に対する相対速度に関する
追従車両 i の敏感度パラメータ

$\Delta v_i^{(j)}$: 前方車両 j と追従車両 i との相対速度(m/s)

T : 反応時間(sec)

である。

これまでの研究成果より、相対距離が追従車両の行動に及ぼす影響は相対速度よりも小さいが、確実に影響を持つことが示されている。そこで、複数の前方車両との相対速度($\Delta v_i^{(j)}$)のみを考慮した **Bexelius model** では、追従車両

の相対距離に対する反応よく説明できないという短所がある．すなわち，前方車両と追従車両の似ている相対速度場合や，相対距離が小さい状況での追従車両の運転者は，相対速度より相対距離に依存して応じるが，Bexelius model(1968) ではこのような追従行動を説明することができない．これは追従車両が，もちろん前方車両との相対速度にのみ依存して追従する場合もあるが，大部分の追従車両は前方車両との相対速度だけでなく相対距離に応じて走行する場合が大半である．よって，実質的な多重追従行動を表現するためには，複数の前方車両との相対速度と相対距離の両方を考慮する必要がある．

2.4.3 Generalized Helly Model

Generalized Helly model は，Ossen and Hoogendoorn(2006, 2007)によって示されたモデルであるが，Helly(1959)によって示された Linear model(Helly, 1959, 2.4 節を参照)から拡張されたモデルである．Helly model(1959)は，直前の前方車両にだけ応じる単独車両追従モデルであるが，多重車両追従モデルである Generalized Helly model での追従車両は，多重の前方車両に応じて追従するという概念を持っている．また，このモデルは多重車両追従行動を相対速度と相対距離（相対距離と希望距離間の差（相対距離-希望距離））を利用して，線形関係で簡単に説明する．前節で提示した Bexelius model(1968) は多重車両追従行動を前方車両との相対速度のみを考慮して表現するが，Generalized Helly model は同じ構造で相対速度及び相対距離の両方を利用して表現したモデルである．Generalized Helly model は式 2.15 のように表される（このモデルは単独追従モデルである Helly model(式 2.4)から派生した）．

$$\text{Generalized Helly model: } a_i(t+T) = \sum_{j=1}^{m_{1,i}} \alpha_i^{(j)} \Delta v_i^{(j)}(t) + \sum_{j=1}^{m_{2,i}} \beta_i^{(j)} (\Delta x_i^{(j)}(t) - S_i^{(j)})$$

式 2.15

ここで，

- a_i : 追従車両の加速度(m/s²)
- $\alpha_i^{(j)}$: 前方車両 j(for j=1, …, m)に対する相対速度に関する追従車両 i の敏感度パラメータ
- $\beta_i^{(j)}$: 前方車両 j(for j=1, …, m)と追従車両 i の相対距離と希望距離(desired distance)との差に対する追従車両の敏感度パラメータ
- $\Delta v_i^{(j)}$: 前方車両 j と追従車両 i との相対速度(m/s)
- $\Delta x_i^{(j)}$: 前方車両 j と追従車両 i との相対距離(m)
- $S_i^{(j)}$: 前方車両 j に対して追従車両 i が要求する希望距離(m)
- T : 反応時間(sec)

である.

Generalized Helly model(2006, 2007)は j 番目の前方車両に対する希望距離を推定するため, 次の式 2.16 のように Desired distance (希望距離) に対する関係式を提示している.

$$S_i^{(j)} = s_{0,i} + j\tau_i v_i \quad \text{式 2.16}$$

ここで,

- $S_i^{(j)}$: 前方車両 j に対して追従車両 i が要求する希望距離(m)
- $s_{0,i}$: 追従車両 i による停止距離(m)
- τ_i : 前方車両 j と追従車両 i との最小車尾間隔(sec)
- v_i : 追従車両 i の速度(m/s)

である.

Generalized Helly model では, また, 推定しないパラメータ m_{1j}, m_{2j} つまり多重追従行動を分析するため考慮される多重前方車両との相対速度と相対距離の数を表すパラメータが用いられる. これらは線形関係で, 考慮する多重の前方車両に応じた追従車両の加速, 減速を表現するためのものである. Generalized Helly model は簡単な構造式で複数の前方車両との追従関係を説明するだけでなく, 相対速度のみを考慮した Bexelius model に相対距離と希望距離間の差も考慮して, より現実的な多重追従行動を表現できるという長所がある.

2.4.4 多重車両追従モデルの比較

本項では多重追従モデルとして, Lenz モデル, Bexelius モデルそして Generalized Helly モデルを比較する.

Lenz model を利用して多重の前方車両に対する追従行動を分析する場合は, どのような区間でも最適速度(Optimal velocity)を算定するための希望速度(Desired speed)が要求される. ここで, 希望速度は道路の幾何構造によって変化しやすく, 短い区間での希望速度を求めることは比較的難しい. したがって, 一貫的な最適速度の算定するのは難しいと判断でき, このモデルを利用して分析する場合は追従車両の行動を十分には表現できない可能性があると考えられる.

また, 複数の前方車両との相対速度だけで多重追従行動を表現する Bexelius model(1968)を適用して分析する場合, 追従車両が相対速度より相対

距離により依存して応じる状況(似ている相対速度, 相対距離が小さい状況)に対しては追従行動を説明できないという短所がある. これより, 相対速度のみを考慮した **Bexlius model**(1968)では, 多重追従行動をよく表現できず, また, 相対距離も考慮する必要があるといえる.

Generalized Helly modelは **Lenz model** よりも簡単なモデル構造を取っており, 道路の幾何構造による多重の前方車両に対する追従行動と運転者の特性を分析しやすいと判断ができる. また, 前方車両との相対速度だけでなく相対距離も考慮しており, **Bexlius model** では説明できない多重追従行動もよく表現することができ, 多重追従行動をより現実的に説明していると考えられる.

2.5 本研究の特性及び位置づけ

運転者の行動は, 交通事故や交通渋滞などのさまざまな交通問題に影響を及ぼしており, これらの問題を解決するためには運転者の行動や特性を理解する必要がある. したがって, 走行する運転者の行動や特性を理解することは, 交通システム評価及びオペレーションを決めるのにおいて重要な役目を果たす. 運転者の行動に関する研究は 1960 年代から増えている. 運転者の行動は交通問題に直接的に影響を及ぼすため, ミクロ水準での運転者行動に対する分析が必要である. これを分析するためには精緻な車両データが必要であるが, 近年はビデオ画像処理技法の発展により, ビデオ画像データから精緻な車両データの抽出が可能になった. これに基づいて 2.2 節で示したように, ビデオ画像データから抽出した車両データを利用して, 運転者の行動の推定や証明に関する研究が行われている. しかし, 特に複雑な車両挙動が観測される合流部での運転行動に関しては, 大部分の研究が合流区間でのギャップ選択行動に対して, ‘ギャップを選択する, 選択しない’ という簡単な選択に関する運転者合流行動分析に焦点を合わせており, また, ミクロな観点での運転者の行動 (e.g. 追従行動, 追い越し行動, 車線変更行動, 合流行動など) に関する研究自体が少ない.

実際に一般区間だけでなく, 合流区間での運転者は非常に複雑な行動を伴って走行する. 特に, 合流区間では, ギャップを選択する行動だけでなく, 前方車両を追従する車両追従行動を行う. 合流行動は, このような複雑な合流過程によって成り立っているが, このような合流過程を分析・解析した研究は少ない. さらに, 運転者の行動は運転者ごとに多様性を持っているが, これを考慮した運転者行動分析に関する研究はほとんど見られない.

そこで本研究では, ビデオ画像データから得た精緻な車両データを利用し

て、最も基本的な運転者の行動である、追従行動と合流過程のメカニズムを分析して理解することに焦点を当てた。追従行動分析に関しては、2.3 節と 2.4 節で示した単独及び多重車両追従モデルに対する研究は、大部分が推定パラメータの最適な組み合わせを捜すことに焦点が当てられている。これに対し本研究では、2.3 節と 2.4 節で示した車両追従モデルを適用して、運転者の多様性を考慮した運転者の行動を分析して、運転者の行動の異質性や、このような多様な行動に影響を及ぼす要因を分析する。

本研究の分析対象区間は、阪神高速道路の守環合流部で、守口線 2 車線と環状線 3 車線が合流して 4 車線になる区間である。この区間では 2 つの車線が 1 車線に合流するため強制的な合流が発生し、異なる 2 つの交通流間の摩擦によって、守環合流部の交通需要と道路構造は交通事故や渋滞を起こしている（服部,2007）。高速道路のオンランプ合流区間、すなわち主道路と従道路が合流する合流区間での合流挙動は、一般的に合流において優位性が明確であるから、オンランプの従道路（合流車線）の車両が主道路（走行本車線）に合流するためにギャップ選択をする、あるいは走行本車線の車両が優位性をゆずるといった合流プロセス中の役割分担を容易に想像することができる。しかし、守環合流部はどちらも交通量が多く、主従の関係が明確には存在せず、時間的に複雑な合流過程が現れることが予想できる。よって、本対象区間である守環合流部の合流行動に関する分析は、高速道路オンランプに対する合流分析方法とは違う視点で分析する必要がある。また、合流区間における運転者の行動は、複雑な合流過程を通じた合流挙動となるにもかかわらず、今までの合流区間の運転者行動に関する研究のほとんどが、ギャップ選択の行動分析にのみ焦点を合わせている。したがって、本研究では合流区間に現われることができる運転者の行動に関して、ギャップ選択の行動だけでなく、合流しながら追従する車両の行動に着目して合流プロセスを分析・解析する。このような合流区間での複雑な合流挙動を明確に示すことで、交通渋滞や事故の原因となる運転者の行動を抑制する施策が提案できる。また、合流区間での運転者行動の分析に基づいて構築した合流挙動モデルは、複雑な合流行動の把握及びミクロ視点での交通シミュレーションの再現性向上に、必要不可欠であると考えられる。

2.6 結論

本章では、本研究と関係がある既存研究を整理して、その研究の特性や問題点について議論した。まず、ビデオ画像処理技法に関する研究を紹介して、これに基づいてビデオ画像データを利用した運転者行動の推定に関する研

究結果を説明した．2.2 節で示したように，今までマイクロな視点での運転者行動に焦点が合わせられた研究は少ない．また，いくつかのマイクロシミュレーションモデルが開発されたが，それらのモデルは非常に簡単で運転者行動を表現するのに十分とは言えない．

さらに運転行動特性は運転者によって多様であると考えられるものの，これを考慮した運転者行動分析に関する研究はほとんど見られない．また，合流区間での運転者の行動は，合流だけでなく追従する複雑な合流行動が現れるにもかかわらず，今までの研究のほとんどが，ギャップ選択の行動分析に焦点を合わせて合流過程を説明している．そこで本研究では，2.3 節と 2.4 節で示した単独及び多重車追従モデルを利用して，最も基本的な運転者行動である追従行動と合流行動に焦点を合わせて分析し，さらに運転者の行動の異質性とそこに影響に及ぼす要因を分析する．

このような問題点に基づいて，本研究での特性及び位置づけを要約すると，次のようになる．

- 1) ビデオ画像データ上の車両のプロットを手動で抽出するシステムと同一車両に対するカメラ間の連結システムを開発して，本対象合流区間でのビデオ画像データから精緻な車両データを取得する．
- 2) ビデオ画像データから取得した精緻な車両データを利用して，車両追従行動において運転者の異質性とそこに影響を及ぼす要因について議論する．
- 3) 分析した運転者の追従行動に基づいて，運転者の多重追従行動を分析し，道路幾何構造による多重追従行動の異質性について議論する．
- 4) 本対象区間である合流区間における運転者の，合流しながら追従する行動を分析して合流挙動に関するモデルを構築して，合流区間で発生する合流過程を分析し解釈する．

参考文献

- [1] 大口敬. “高速道路単路部渋滞発生解析－追従挙動モデルの整理と今後の展望－”, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp39-51, 2000.
- [2] 内山久雄. “高速道路において工事時の合流意思決定プロセスのモデル化”, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp29-37, 2000.
- [3] 尾崎晴男. “自動車の追従走行挙動に関する研究”, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.375-380, 1991.
- [4] 山崎浩気, 高山純一, 中山晶一郎, 宇野伸宏. “一般道路合流部におけるミクロ交通シミュレーションのための合流挙動解析”, 第33回土木計画学発表会・講演集, 2006.
- [5] 若林拓史, 高橋吉彦, 新実栄浩, 蓮華一巳. “交通流ビデオ解析システムを用いた交通コンフリクト分析と新しい危険度評価指標の提案”, 土木計画学研究・論文集, Vol.20.No.4., pp.949-956, 2003.
- [6] 渡辺将光, 中村英樹. “ビデオ画像を用いた都市高速合流部における合流挙動に関する分析”, 第32回土木計画学研究発表会, 2005.
- [7] Ahn, S., Michael J. Cassidy . and Jorge Laval. “Verification of a simplified car-following theory”, *Transportation Research Part B* 38, pp. 431-440, 2004.
- [8] Aron, M. “Car following in an urban network: simulation and experiments”, *In Proceedings of Seminar D, 16th PTRC Meeting*, pp.27-39, 1988.
- [9] Bando, M., et al, “Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation”, *Physical Review E* 51, 1995, pp.1035-1042.
- [10] Benekohal, R. F. “Procedures for the validation of microscopic traffic simulation models”, *Transportation Research Record* 1320, pp.190-202, 1991.

- [11] Benekohal, R. F., and Treiterer, J. "CARSIM: car following model for simulation of traffic in normal and stop and go conditions", *Transportation Research Record 1194*, pp.99-111, 1989.
- [12] Benz, T. "Checking AICC in a Realistic Traffic Environment", *In Proceedings of the First World Congress on ATT*, pp.925-932, 1995.
- [13] Bexelius, S. "An extended model for car-following", *Transportation Research*, Vol.2, pp.13-21, 1968.
- [14] Brackston M. and McDonald M. "Car-following: A historical review", *Transportation Research Part F2*, pp.181-196, 1999.
- [15] Broqua, F., Lerner, G., Mauro, V., and Morello, E. "Cooperative driving: basic concepts and a first assessment of intelligent cruise control strategies", *In Proceedings of the DRIVE Conference*, pp.908-929, 1991. Amsterdam: Elsevier
- [16] Burnham, G. O., and Bekey, G. A. "A heuristic finite state model of the human driver in a car following situation", *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics SMC* 6(8), pp.554-562, 1976.
- [17] Cameron, D. *Proceedings of the 28th ISATA Conference, Advanced Transportation Systems Symposium*, pp.475-484, 1995.
- [18] Ceder, A. "A deterministic traffic flow model for the two regime approach", *Transportation Research Record*, 567, pp.16-30, 1976.
- [19] Ceder, A. "The accuracy of traffic flow models: a review and preliminary investigation", *Traffic Engineering and Control*, December, pp.541-544, 1978.
- [20] Ceder, A. "Stable phase-plane and car following behaviour as applied to a macroscopic phenomenon", *Transport Science*, 13, pp.64-79, 1979.

- [21] Ceder, A., & May, Jr., A. D. "Further evaluation of single and two regime traffic flow models", *Transportation Research Record*, 567, pp.1-30, 1976.
- [22] Chandler, R.E., Herman, R., and Montroll, E.W. "Traffic Dynamic: Studies in Car following", *Operations Research*. Vol.6, pp.165-184, 1958.
- [23] Coifman, B., Beymer, M. and Mclauchlan, P. "A real time computer vision system for vehicle tracking and traffic surveillance", *Transportation Research Part C6*, pp.271-288, 1998.
- [24] Edie, L.C. "Car following and steady state theory for non-congested traffic", *Operations Research*. Vol.9, pp.66-76, 1960.
- [25] Evans, L., and Rothery, R. "Experimental measurement of perceptual thresholds in car following", *Highway Research Record*, 64, pp.13-29, 1973.
- [26] Evans, L., and Rothery, R. "Perceptual thresholds in car following : a recent comparison", *Transportation Science*, 11 (1), pp.60-72, 1977.
- [27] Fritzsche, H.T. "A Model for Traffic Simulation", *Traffic Engineering and Control*, pp.317-321, 1994.
- [28] Gazis, D.C., Herman, R. and Rothery, R.W. "Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow", *Operation Research*, Vol. 4, pp.545-567, 1961.
- [29] Gipps, P. G. "A behavioural car following model for computer simulation", *Transportation Research B*, Vol. 15, pp.105-111, 1981.
- [30] Hanken, A., and Rockwell, T.H. "A model of car following derived empiriacally by piece-wise regression analysis", *In Proceedings of the 3rd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, pp.40-41, New York: Elsevier.1967.
- [31] Herman, R., and Potts, R.B. "Single lane traffic theory and experiment", *In Proceedings of Symposium on Theory of Traffic Flow*, Research Labs,

- General Motors. 1959, pp.147-157, New York: Elsevier.
- [32] Helly, W. "Simulation of Bottlenecks in Single Lane Traffic Flow", *In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow., Research Laboratories, General Motors*, pp.207-238, New York: Elsevier.1959.
- [33] Hoogendoorn, S.P., Ossen, S. and Schreuder, M. "Properties of a microscopic heterogeneous multi-anticipative traffic flow model", *Transportation and Traffic Theory 2007*, pp.583-606.
- [34] Hoogendoorn, S.P., Ossen, S. and Schreude, M. "Empirics of multi-anticipative car following behavior", *Transportation Research Record*, No.1965, pp.112-120, 2006.
- [35] Kikuchi, C., and Chakroborty, P. "Car following model based on a fuzzy inference system", *Transportation Research Record, 1365*, pp. 82-91, 1992.
- [36] Kometani, E., and Sasaki, T. "Dynamic behaviour of traffic with a nonlinear spacing-speed relationship", *In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors*, pp.105-119, 1959. New York: Elsevier.
- [37] Krauss, S. "Towards a unified view of microscopic traffic flow theories", *In Proceedings of the IFAC Transportation System Conference*, pp.941-945, 1997.
- [36] Kumamoto, H., Nishi, K., Tenmoku, K., and Shimoura, H. "Rule based cognitive animation simulator for current lane and lane change drivers", *In Proceedings of the Second World Congress on ATT*, pp.1746-1758, 1995.
- [38] Leutzbach, W., and Wiedemann, R. "Development and applications of traffic simulation models at the Karlsruhe Institut fur Verkehrswesn", *Traffic Engineering and Control*, pp.270-278, 1986.
- [39] Lee, D. N. "A theory of visual control of braking based on information about time to collision", *Perception*, Vol.5, pp.437-459, 1976.

- [40] Lee, J., and Jones, J.H. "Traffic dynamics: visual angle car following models", *Traffic Engineering and Control*, pp.348-350, 1967.
- [41] Leutzbach, W., and Wiedemann, R. "Development and applications of traffic simulation models at the Karlsruhe Institut fur Verkehrswesen" *Traffic Engineering and Control*, pp.270-278, 1986.
- [42] Lenz, H., Wanger, C.K. and Sollacher, R. "Multi-anticipative car-following model", *The European Physical Journal B*(7), pp.331-335, 1999.
- [43] McDonald, M., Brackstone, M., and Jefery, D. "Simulation of lane usage characteristics on 3 lane motorways", *Proceedings of the 27th ISATA Conference*, Aachen Germany, 1994.
- [44] Michaels, R.M. "Perceptual factors in car following", *In Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*, pp. 44-59, 1963. Paris: OECD.
- [45] Mousa Krauss, S. "The Use Of Micro Simulation For The Design Of Weaving Sections. Highway Capacity and Level of Service.", *Proceedings of The International Symposium On Highway Capacity, Karlsruhe, Germany*, pp.24-27, 1991.
- [46] Mousa, R.M., Rouphail, N.M. and Azadivar, F. "Integrating microscopic simulation and optimization", *Application to freeway work zone traffic, Transportation Research Record 1254*, pp.14-25, 1992.
- [47] Nonaka, Y., Kasaki, M. and Uchiyama, H. "A study on the development of a system to obtain data of car behaviour on a normal section of the interurban expressway", *ITS Symposium*, pp.271-276, 2004.
- [48] Nonaka, Y., Kasaki, M. and Uchiyama, H. "A study on the development of a system to obtain data of car behaviour on a normal section of the interurban expressway", *ITS Symposium*, pp.271-276, 2004.

- [49] Ossen, S. and Hoogendoorn, S.P. "Car following behavior analysis from microscopic trajectory data", *In Transportation Research Record*, No.1934, pp.13-21, 2005.
- [50] Ossen, S., Hoogendoorn, S.P. and Gorte, B. "Inter-driver differences in car following: a vehicle trajectory based study", *Presented at 8th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2006.
- [51] Shimizu, T. and Yamada, T. "An Analysis of Driver's Behavior at Merging Section on Tokyo Metropolitan Expressway with the Viewpoint of Mixture AHS System", *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2000.
- [52] Suzuki, K. and Nakamura, H. "Development of simple multifunctional video image processing system for traffic flow analysis", *Proceedings of the 24th Congress of Japan Society of Traffic Engineers.*, pp.69-72, 2000.
- [53] Shimizu, T., Yai, T. and Iijima, Y. "An Analysis of the Effect on Driver's Behavior of Information System at Merging Section of Expressway", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Vol.4, No.4, pp.69-72, 2004.
- [54] Rockwell, T.H., and Treiterer, J. "Sensing and communication between vehicles", *The Ohio State University, Systems Research Group*, Final Report No. EFS 227-2. Columbus, Ohio, 1966.
- [55] Uno, N., Iida, Y., Itsubo, S., and Yasuhara S. "Microscopic analysis of traffic conflict caused by lane-changing vehicle at weaving section", *Proceedings of the 13th Mini-Euro Conference*, pp.143-148, 2003.
- [56] Xing, J. "A parameter identification of a car following model", *In Proceedings of the Second World Congress on ATT*, pp.1739-1745, 1995.
- [57] Yet, T.H. "Impact of rain to highway traffic and driver's deceleration behaviour", *Maser paper in Department of Transportation and Logistics of Malaysia University of Science and Technology*. 2005.

- [58] Wiedemann, R., and Reiter, U. "Microscopic traffic simulation: the simulation system MISSION, background and actual state", *CEC Project ICARUS (V1052), Final Report, vol. 2, Appendix A. Brussels: CEC*, 1992.
- [59] Wu, J., McDonald, M. and Chatterjee, K. "A detailed evaluation of ramp metering impacts on driver behaviour", *Transportation Research Part F*, pp.61-75, 2007.
- [60] Zhang, X., and Forshaw, M.R.B. "A parallel algorithm to extract information about the motion road traffic using image analysis", *Transportation Research Part C5*, pp.141-152, 1997.
- [61] Zarean, M. and Nemeth, Z.A. "WEAVSIM: A Microscopic simulation model of freeway weaving", *Transportation Research Record 1194*, pp.48-54, 1990.

第 3 章 車両挙動データの抽出

3.1 概要

本研究では、交通流を記録した映像から画像処理によって個別車両の走行を追跡してその走行挙動データを現地座標系で出力し、それらのデータを用いて車両の挙動を分析することを目的としている。本章では、4、5 章の追従挙動や多重追従挙動の分析ならびに 6 章の合流挙動の分析で用いる、車両軌跡データについて概説する。本研究では、渋滞が慢性化している阪神高速道路 1 号環状線と同 12 号守口線の合流部（以下、守環合流部）を対象とする。当該区間では、阪神高速道路株式会社により、渋滞対策の検討を目的として、平成 17 年 8 月 29 日～31 日の間、同合流部の環状線側の車線運用を暫定的に変更するという社会実験が行われた。

上記の実験期間中の車両・車群をビデオ観測して、本研究では、画像データからの車両軌跡データの抽出を行った。以下では、時々刻々の走行挙動をデータとして提供可能な、手動取得による車両軌跡データに注目し、その抽出方法、複数カメラ間での車両軌跡の連結方法、そして、軌跡の平滑化法について概説する。

3.1.1 分析対象区間の概要

本研究では、図 3.1 のように阪神高速道路 1 号環状線と 12 号守口線が合流する区間を分析対象区間(以下守環合流部と記す)として選定した。阪神高速道路 1 号環状線は 1965 年に全線が開通して以来、大阪市中心部を環状につなぐ都市高速道路の要所として非常に多くの交通に利用されている。当該区間は、図 3.2 のように北摂地域と大阪市街地を結ぶ守口線の 2 車線と環状線の 3 車線が合流し、合流後には合わせて 4 車線となる区間である。両路線とも交通量が非常に多いことに加えて、合流前 2 車線+3 車線が合流後には 4 車線となることもあり、交通流の円滑性・安全性の点で、当該区間は種々の問題が生じている箇所である。このことも、当該区間を分析対象として選定した一つの理由である。

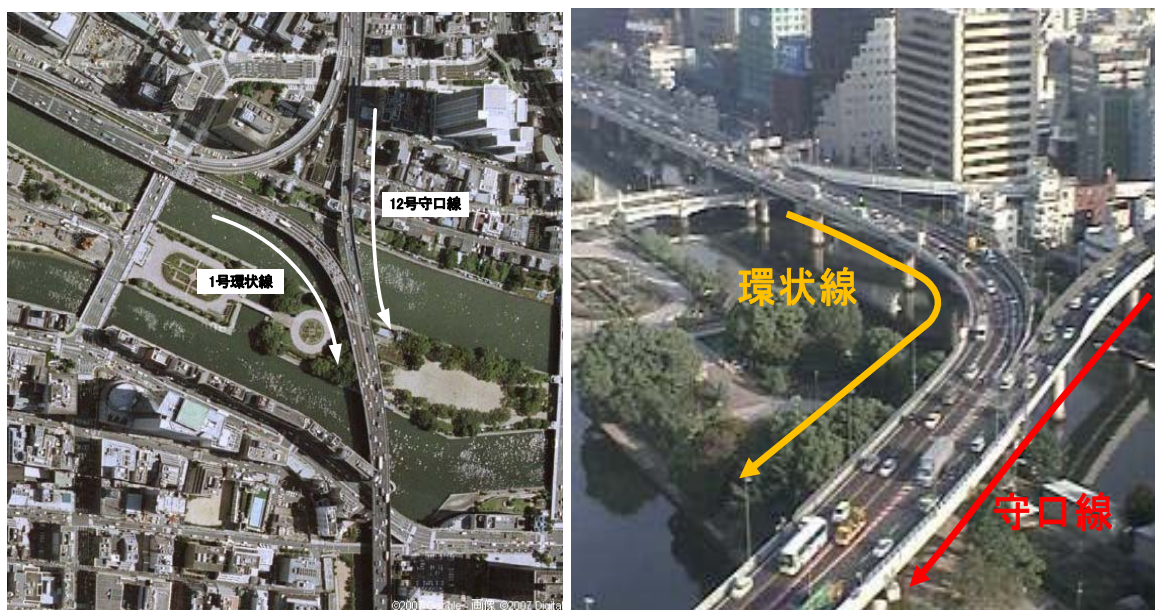


図 3.1 守環合流区間全景

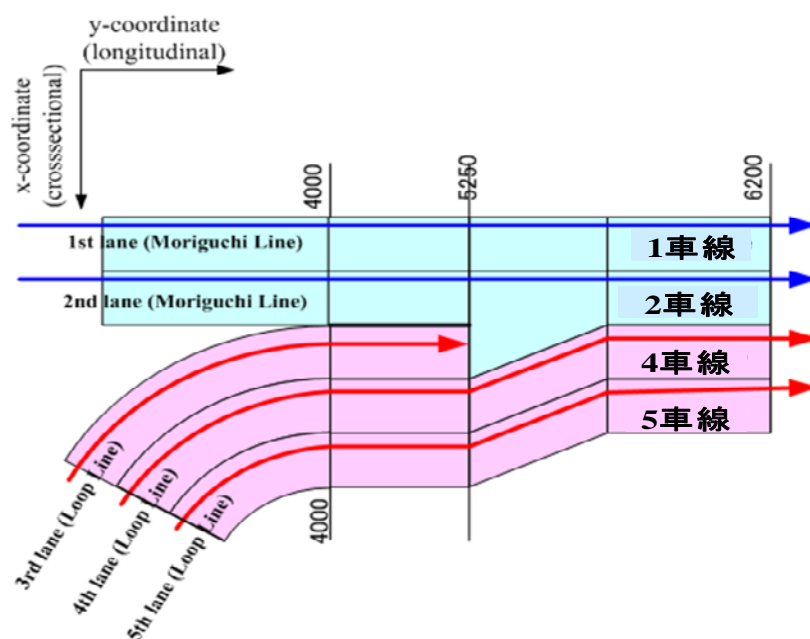


図 3.2 守環合流部における車線構成図

3.1.2 分析対象区間の交通状況

分析対象区間は図 3.3 に示した通り，平成 16 年 9 月平日平均で 8 時間／日の渋滞が発生している地点である．またその下流部において，一日平均 2～4 時間の渋滞が発生していることから推測すると，当該分析区間およびその上下流で発生している渋滞については，その半数から 7 割程度が守環合流部の合流地点を先頭とするものと考えられる．

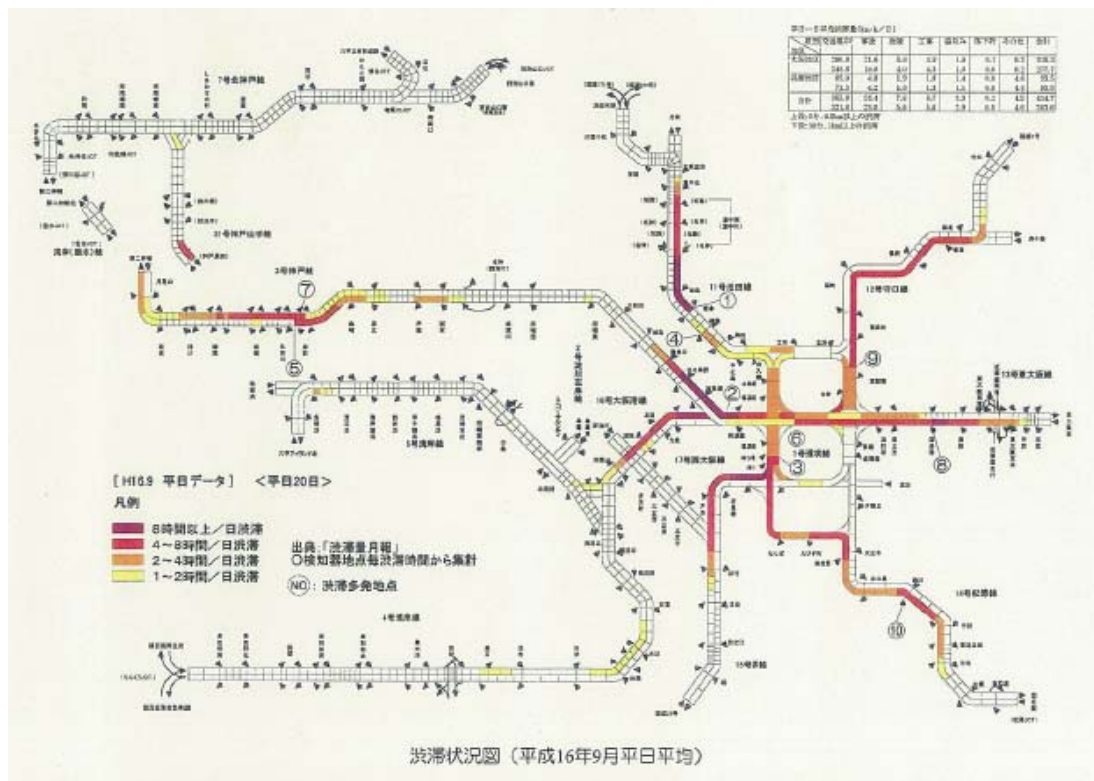


図 3.3 阪神高速道路における渋滞状況図（平成 15，16 年）

（出典：阪神高速道路の交通渋滞に関する調査研究委員会 平成 16 年度第 2 回幹事会資料）

まずは、交通統計から研究対象地点の状況について整理する．図 3.4 は、守環合流部における時間帯別交通量(第 21 回阪神高速道路起終点調査結果より)について示している．これより、7～18 時の間は、非常に当該区間を利用する交通量が多いことがわかる．時間帯別交通量としては、7,000(台/時)以上が観測されている．また交通量の内訳を見てみると、朝の 4 時～7 時の間は、半数強が守口線からの交通量であるが、その後は環状線からの交通量が半数強を占め、残りのうち 40%程度が守口線からの流入交通となっている．

この地点の時間帯別の渋滞発生状況について示したのが図 3.5 である．これより、渋滞の多くが朝の 8～10 時の間に生じていることがわかる．先に示したように 7～17 時には当該区間の利用交通量に大きな変動がないこと、一日平均でおよそ 8 時間程度の渋滞が発生していること、そして渋滞の多くは午前中に発生していることから推測すると、図 3.4 に示された昼間時間帯の交通量は交通需要を表現しているのではなく、下流部側あるいはこの地点の交通容量を示しているに過ぎないといえる．すなわち昼間の下流の処理能力は 7,000～7,500(台/時)程度と推測される．

交通量(台/時)

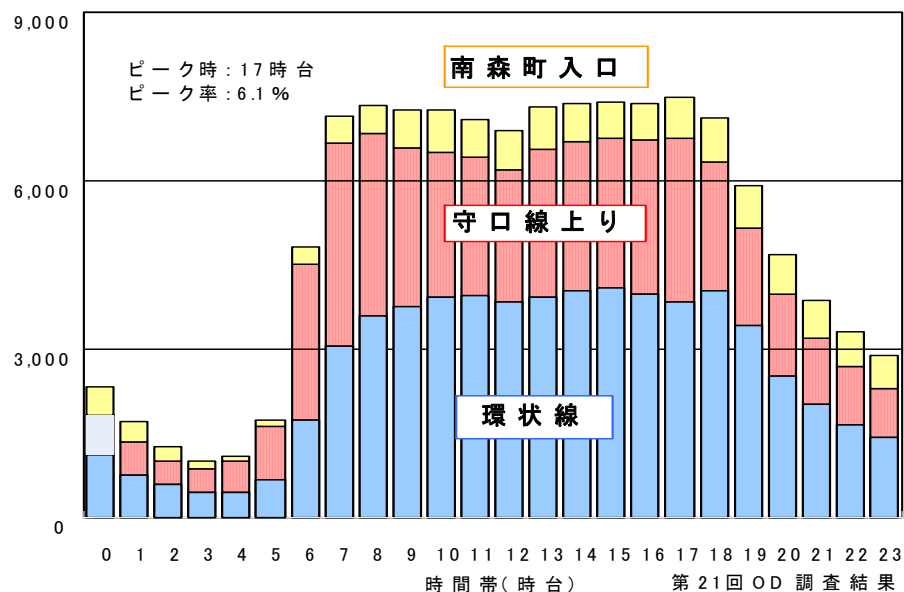


図 3.4 時間帯別交通量の推移

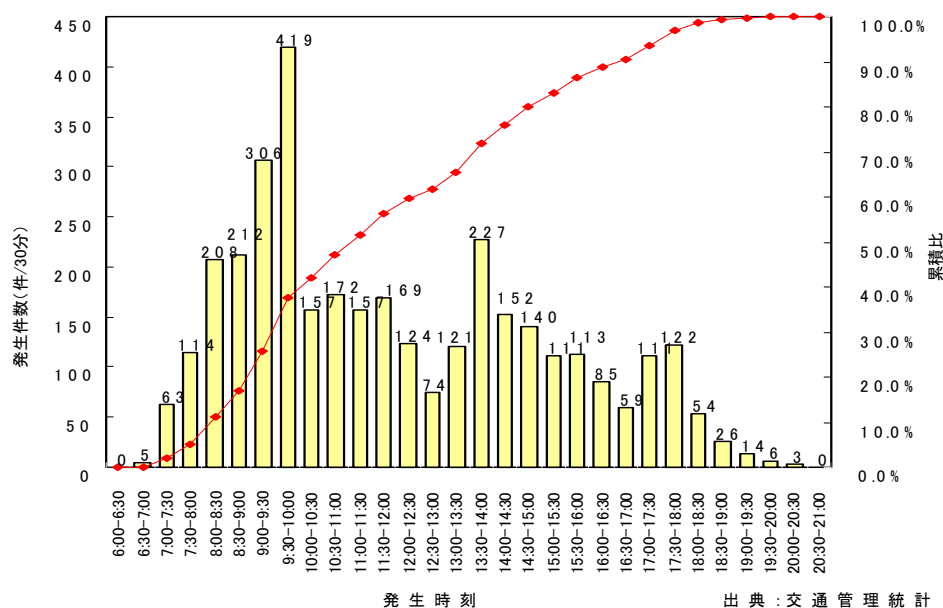


図 3.5 渋滞発生時刻の時間推移

(出典：阪神高速道路の交通渋滞に関する調査研究委員会 平成 16 年度第 2 回幹事会資料)

参考までに環状線における交通事故発生状況について示したのが図 3.6 である。守環合流部は環状線の 4.0～4.2 キロポストに位置しており、図より 2.9 キロポスト付近の池田線合流部付近と並んで特に交通事故発生件数が高い地点であることもわかる。すなわち、守環合流部は、交通効率性の面からも交

通安全性の面からも問題のある地点といえる。

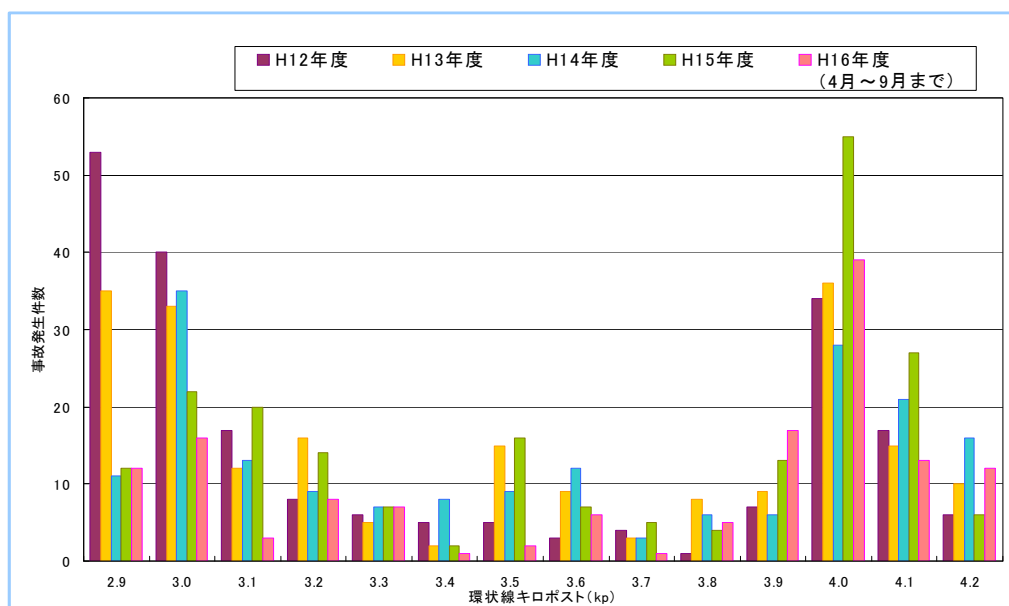


図 3.6 環状線での交通事故発生件数の推移

3.2 画像データから車両軌跡データの抽出

3.2.1 ビデオカメラの設置位置

阪神高速道路では、車両検知器が本線上に約 500m 間隔で設置されており、その設置地点においては継続的かつ比較的高精度な交通量および空間平均速度といったマクロ交通指標が観測可能である。しかし、各車両の走行挙動を詳細に解析するためには、車両挙動に関する詳細なデータが必要となる。そこで本研究では、ビデオカメラ画像データを用いて精緻な車両軌跡プロットを抽出し、それを利用することで車両走行挙動の解析を試みる。なお、ビデオカメラ画像データの取得に際しては、(株)住友電気工業株式会社が開発された機器を活用させていただいた。

カメラからの確かに車両軌跡情報を取得するためには、専用のカメラを用いて車両に対する撮影を実施する時、風や雨などの影響を受けない屋内からの撮影が望ましい。さらに、画像内での車両同士の重なり (occlusion) を排除し、車両や遮音壁の影による車両識別精度の低下を防止することで観測精度を高めるためには、より高い位置から真下を見下ろすような形での観測が望ましいこと、ならびにカメラを強固に固定することが必要である。このような条件を考慮し、現地調査を行った結果、守環合流部については(株)大林

組の所有する大阪大林ビルの 27 階から、また合流前の守口線下りと環状線の分流地点前後については大阪 JA ビルの 14 階からそれぞれ撮影した。図 3.7 に示すように、A1～A7, B1～B4 の全 11 台のカメラを利用し、600m に渡る区間での交通流観測を試みた。

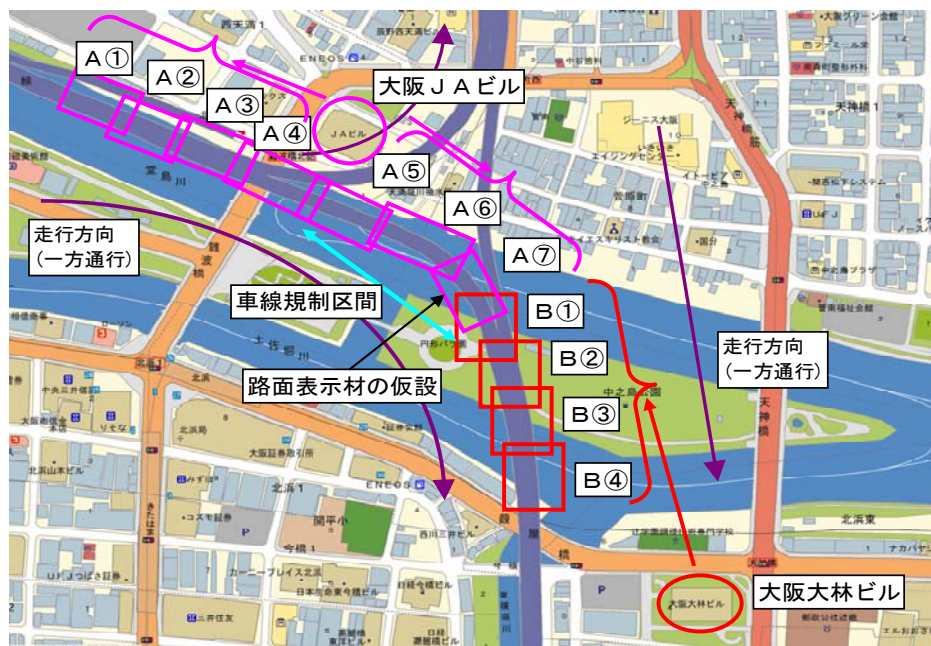


図 3.7 カメラ設置位置と撮影地点

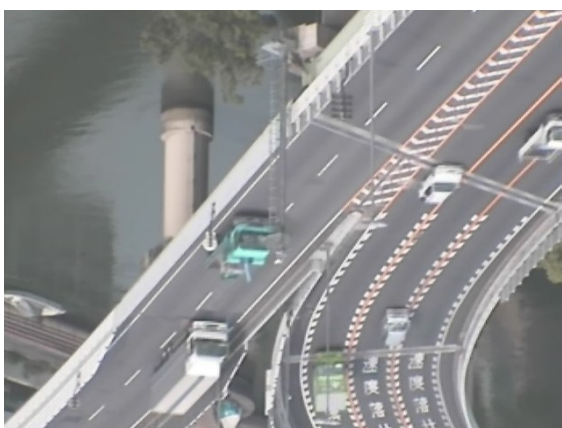
図 3.8, 図 3.9 にそれぞれ JA ビルおよび大林ビルから撮影した 2005 年 8 月 30 日のビデオ画像（静止画）を示す。2005 年 8 月 30 日の 8:49:00～9:04:00 の 15 分間の画像データを使用し、目視により手動で車両軌跡プロットの抽出を行った。この時間帯は車両検知器データや自動抽出された画像データの分析結果より、自由流状態と渋滞流状態が混在している時間帯であることが分かっており(図 3.10 参照), 一様ではない車両走行挙動が観測されていると考えたため、上記の 15 分間の時間帯を抽出した。



B ③カメラ(合流部・規制区間)



B ④カメラ(合流部下流)



B ①カメラ(合流部上流守口線)



B ②カメラ(合流部)

図 3.8 設置ビデオカメラからの画像（大林ビルからの撮影）



A ⑦カメラ(合流部上流区間)



A ⑥カメラ(合流部上流区間)



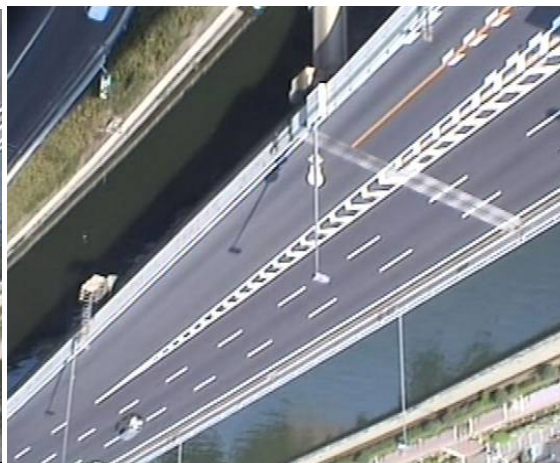
A ⑤カメラ(合流部上流)



A ④カメラ(合流部上流)



A ②カメラ(分流部上流)



A ③カメラ(分流部付近)



A ①カメラ(分流部上流)

図 3.9 設置ビデオカメラからの画像 (JA ビルからの撮影)

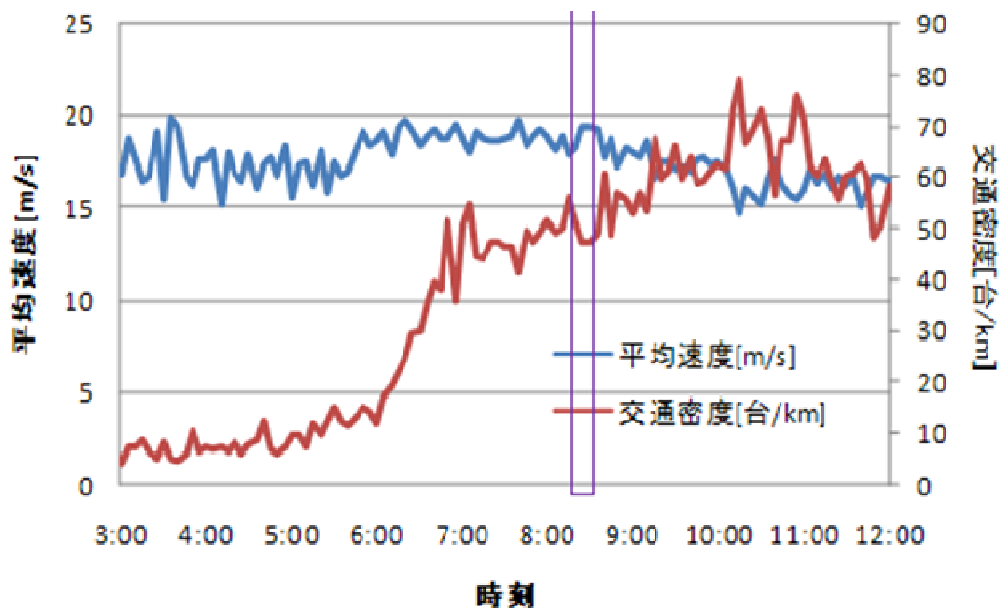


図 3.10 対象時間帯 交通量・速度関係図

3.2.2 画像データの映像処理方法

カメラ座標から現地座標への変換においては，従来通り進行方向を y 座標に，横断方向を x 座標として進めている． y 座標については全てのカメラにおいて共通の座標軸として設定しているが， x 座標については今回の画像は合流部を含むこともあり容易ではない．そのため，画像処理ごとに独立の x 座標を設定して分析を進めている．図 3.11 に全体の座標系を示す．ただし，図中赤色系で示した車線を環状線，青色系で示したものを守口線として定義している．すなわち，環状線は最上流地点から最下流地点まで接続されているが，守口線については， $y=3000$ 程度までの守口線下りを表すものと， $y=4200$ 程度より大きい範囲での，守口線上りを示すものに分類される．また，図中四角で囲んだ数字により示しているのが車線名である．ここでは守口線側から 1→5 車線と名付けた．従って，最上流から分流までは第 1 車線が存在せず，合流によって第 3 車線が消滅し，最下流では第 1，2，4，5 の 4 車線となる．

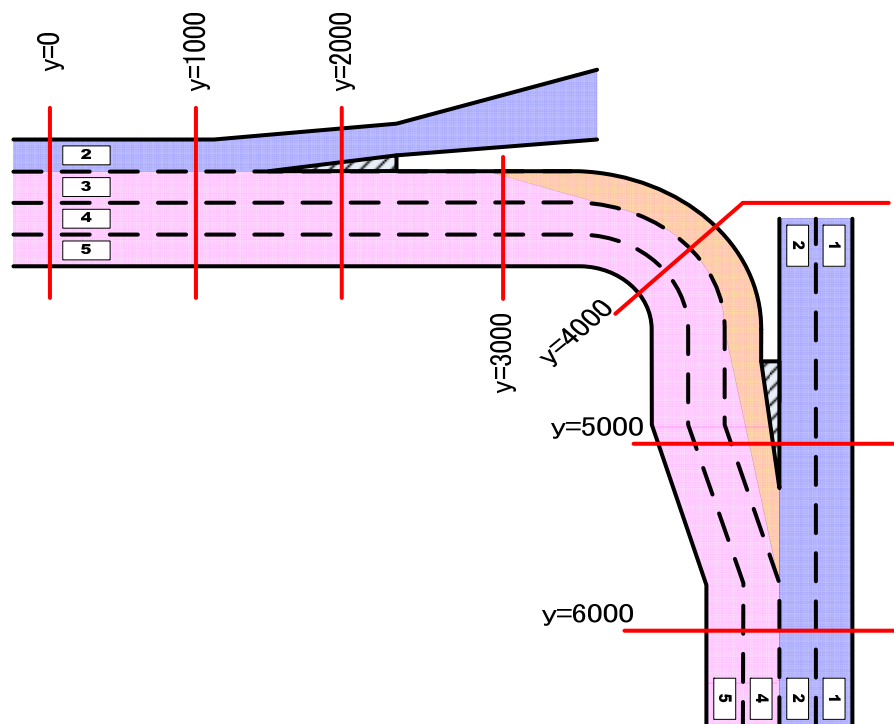


図 3.11 観測地点の座標系

3.2.3 画像データから目視による車両軌跡の取得

本節では手動で車両軌跡プロットを抽出する際に用いたシステムについて述べる．本システムは windows 上で起動するシステムであり，画面上でクリックした位置を記録するとともに，その位置を画面座標から現地座標上の点に変換する機能を有している．図 3.12 に示すように，各車両の最後尾かつ中心の点を静止画像においてクリックすることで，画面上での車両の走行位置が記録される．その際，カメラ番号，車両 ID，日付，時刻，現地座標上の x 座標・ y 座標なども同時に記録される．そしてその静止画像を 0.2 秒毎に進めていくことによって 15 分間の全車両の軌跡データを取得できる．

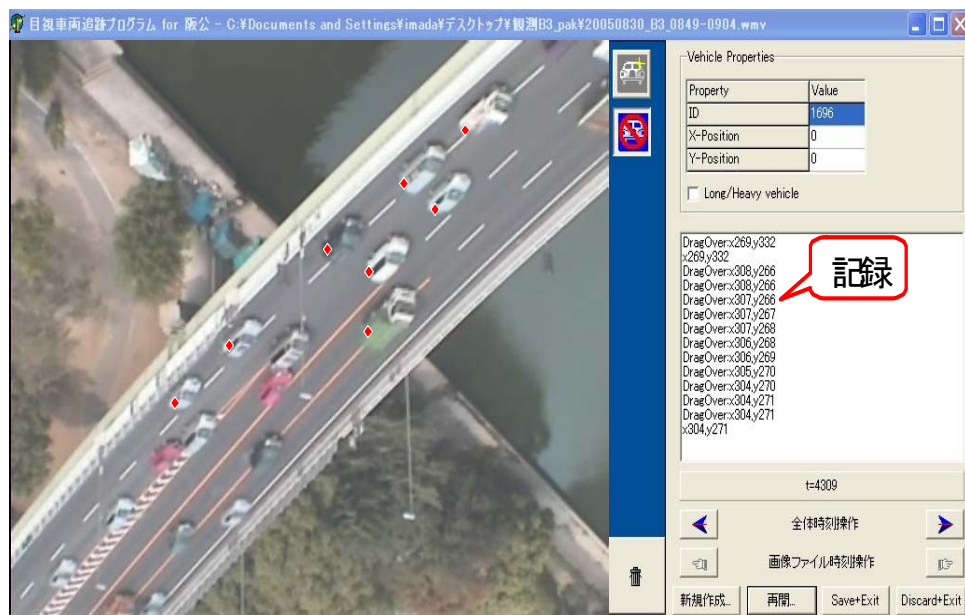


図 3.12 目視車両軌跡観測システムの操作画面

なお x 座標・y 座標は、図 3.13 に示すように x 軸を道路の進行方向に対して垂直に、y 軸を進行方向に沿って定義した現地座標系の上で車両識別が行われている。これら座標系の単位は 10cm である。y 座標の原点は最上流カメラ (A1) 内に設定されており、最下流カメラ (B4) でおおよそ 6200m (y=6200) である。守口線入りは図中、y=4000~6200 の区間を撮影していることとなる。

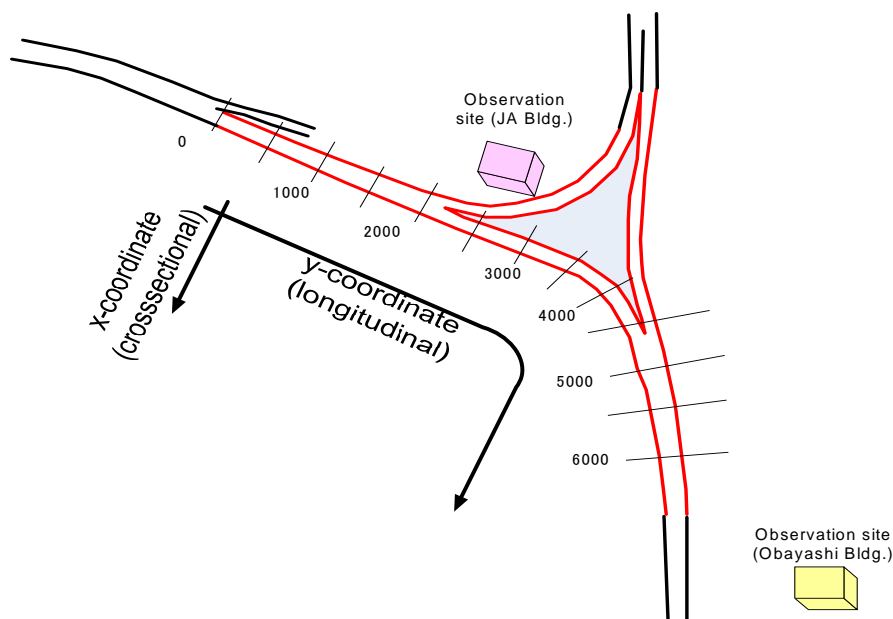


図 3.13 y 座標 (10cm 単位)

守環合流部は環状線 3 車線と守口線 2 車線が合流し，合流後には 4 車線となる．本研究では分析の便宜上，図 3.14 のように守口線の左側から第 1，2 車線とし，環状線の左側から第 3，4，5 車線とし，第 3 車線が第 2 車線と合流し，合流後の車線は守口線の車線の延伸部であると仮定した．そのため，合流後は 1，2，4，5 の 4 車線道路となる．上流側の環状線と守口線下りの分流部については守環合流部と整合させるため，守口線下り方面へ分流する車線を第 2 車線としている．

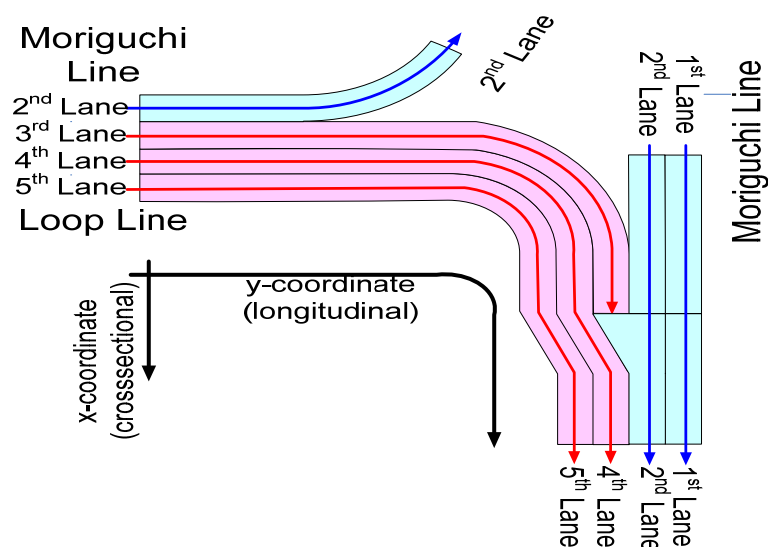


図 3.14 車線の定義

3.3 目視による車両軌跡データの連結及び平滑化

3.3.1 車両軌跡データの連結

前項では各カメラにおいて車両軌跡データを取得する方法を述べた．しかし，カメラ 1 台の撮影範囲，つまりカメラ 1 台当りの車両軌跡データは進行方向におよそ 50m である．しかしこれでは車両走行挙動を解析するに堪え得る区間長とはいいがたいため，複数カメラにまたがる車両軌跡データを連結し，一続きの走行軌跡へと加工する必要がある．その際，隣接カメラ間で生じている時刻や座標系のずれ，軌跡取得の調査員間の差，さらには手動取得の観測誤差を補正する必要がある．そこで本研究では，まず初めにカメラ間での車両 ID の対応関係を割り出し，次にカメラ間でのずれを補正し，最後に連結された軌跡の平滑化を行った．以下では各所作について詳説する．

(1) 同一車両の照合

本研究では A1 から B4 までの計 11 台のカメラを用いるが、車両識別用の ID は、カメラ毎に付与されるため、同一車両であってもカメラ間では車両 ID は整合していない。そこで、車両軌跡データ連結の前に同一車両を照合し、カメラ間における車両同士と、その車両 ID との対応関係を明確にする必要がある。本研究では各カメラ間で同一車両を照合させるために図 3.15 のようなシステムを用いた。

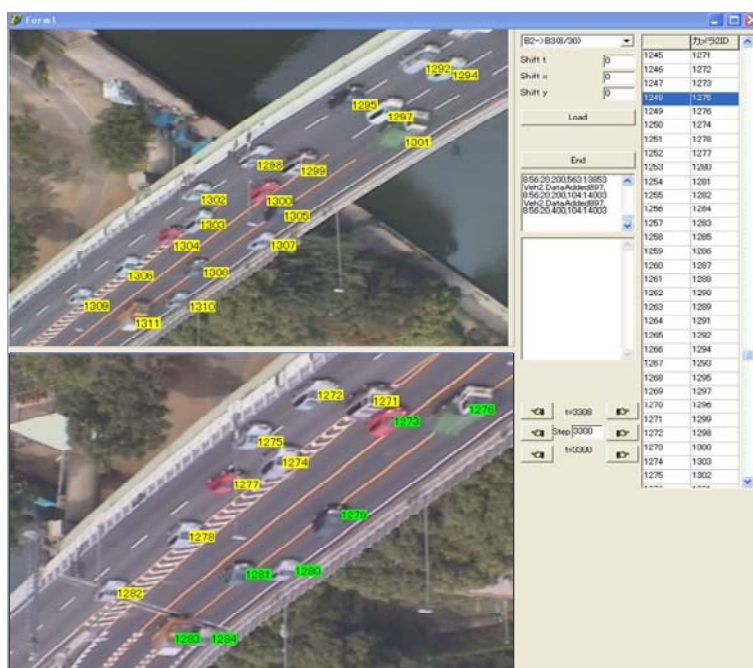


図 3.15 目視による車両 ID 照合ソフトウェアの操作画面

これは撮影範囲が連続する 2 台のビデオカメラ画像を時々刻々見比べながら同一車両を目視で照合し、車両 ID の対応関係を一台ずつ割り出す、という作業を効率化するためのシステムである。このシステムは、上下の画像を認識し、車両の形状や色を元に調査員が目視で車両のマッチングを行う。画面右の表が対応テーブルであり、ID のマッチング情報が表に記入されると下側の画像の ID が上部の参照画像の ID に変化するようになっている。また、ID の色を変化させることによって、効率的にデータ照合が可能となるよう工夫した。

これを A1 カメラから B4 カメラまで行うことにより、同一車両の ID 連結対応テーブルを得た。

(2) 車両軌跡データの連結

前項で述べた同一車両 ID 連結対応テーブルを基に，複数のビデオカメラにまたがる車両軌跡データを連結させた．その際，カメラ間での時刻と座標系のずれの修正を行った．時刻のずれに関しては，先ほどの同一車両 ID の照合作業において，2つのカメラ画像間の車両軌跡を見比べることによって，隣接カメラ間の時刻のずれを特定し，マニュアルで修正を施した．本来であれば最小二乗法等を用いて，2つのカメラ間車両に現われる時刻や座標のずれを最小化するように計算するところではあるが，今回は車両軌跡プロットのスキャンインターバルが 0.2 秒であるため，時刻に関しては離散的に取り扱わざるをえず，このような方法をとった．

本研究で観測したビデオ画像については，カメラ個々の設置条件にも依存するが，基本的にはカメラ間で車両軌跡を接合することを念頭に置いて撮影したものである．そのため，隣接カメラ間で数 m～10m 強オーバーラップする区間を設けた形で撮影を行っている．座標系のずれに関しては，隣接カメラ間のオーバーラップ区間にてとらえられた車両の走行プロットを利用して，最小二乗法に基づいて算出した．算出方法は次の通りである．

今，x 方向のずれを修正する場合を考え，以下のように文字の表記を設定する．

$x_{ij}^{(1)}$: 車両 i の時刻 j におけるカメラ 1 で観測されたプロットの x 座標

$x_{ij}^{(2)}$: 車両 i の時刻 j におけるカメラ 2 で観測されたプロットの x 座標

$X_{ij}^{(12)}$: カメラ 1, 2 間での x 座標のずれ

n : カメラ 1, 2 の両方で観測されたプロット総数

すると，2つのカメラで認識されたプロットの座標のずれを最小二乗するということは $X_{ij}^{(12)}$ に関して式 3.1 を最小化することに等しい．

$$\sum_{i,j}^n \{x_{ij}^{(1)} - (x_{ij}^{(2)} + X^{(12)})\}^2 \quad \text{式 3.1}$$

この式の 1 階条件は次の通りになる．

$$\frac{\partial}{\partial X^{(12)}} \sum_{i,j}^n \{x_{ij}^{(1)} - (x_{ij}^{(2)} + X^{(12)})\}^2 = 0$$

よって

$$\sum_{i,j}^n \frac{\partial}{\partial X^{(12)}} \{x_{ij}^{(1)} - (x_{ij}^{(2)} + X^{(12)})\}^2 = 0$$

$$\sum_{i,j}^n \{-x_{ij}^{(1)} + (x_{ij}^{(2)} + X^{(12)})\} = 0$$

$$X^{(12)} = \frac{\sum_{i,j}^n (x_{ij}^{(2)} - x_{ij}^{(1)})}{n}$$

式 3.2

式 3.2 よりカメラ間での座標系のずれは，2 つのカメラの両方で観測されたプロットの座標のずれを平均した値に等しいといえる．なお，y 座標に関しても同様の議論ができる．

また，この方法によって手動取得により発生する個人差を補正することも可能となっている．すなわち撮影角度の違いなどにより各個人で軌跡が一定の方向にバイアスがかかって抽出されるが，そのバイアスは $X^{(12)}$ に内包されて補正される．以上でカメラ間での車両軌跡は連結される．撮影範囲の共通する部分の車両軌跡の処理については，隣接する 2 つのカメラ（例えばカメラ 1 とカメラ 2）では精度が同じという仮定をおき，単純平均により算出した．

3.3.2 車両軌跡データの平滑化

前項の各カメラ間での座標系の補正は，全車両で平均的に処理したにすぎず，各車両軌跡プロットについては依然較差が残っていると考えられる．また，手動取得した車両軌跡プロットは手動取得システムの画面解像度や偶然誤差などによりそれぞれに観測誤差を含んでいる．それらの影響による車両軌跡の誤差を修正し，一体化された車両軌跡を取得するために車両軌跡の平滑化を行うことにした．本研究では MATLAB の平滑化スプラインプログラムを用いて行った．平滑化スプラインとは，ノンパラメトリックな近似方法で，具体的には指定した平滑化パラメータ p と指定した重み w_i で構成された次式を最小化するものである．

$$p \sum_i w_i \{y_i - s(x_i)\}^2 + (1-p) \int \left(\frac{d^2 s}{dx^2} \right)^2 dx$$

式 3.3

ここで，

x_i : データ i の説明変数の値

y_i : データ i の被説明変数の値

$S(x)$: 近似曲線の関数

p, w_i : パラメータ

である．

p は、0 と 1 の間で定義されるパラメータで、 $p=0$ はデータに対して最小二乗直線を作成し、 $p=1$ はキュービックスプライン内挿を作成する。走行軌跡データに関しては時刻 t 、 x 、 y のうち t が一番信頼できる値と考えられ、各車両の x - t 曲線、 y - t 曲線について平滑化スプラインを行うことで車両軌跡を取得した。パラメータ w_i は、全ての i について $w_i=1$ とし、それぞれのデータについて同等の重みを設定して処理している。またパラメータ p の設定については、 y に関しては加速度が現実的な値におさまるように設定 ($-2.5\text{m/s}^2 \leq a \leq 2.5\text{m/s}^2$) している。 x に関しては横方向が不規則に変化しない程度に設定した。横方向の平滑化スプラインをどの水準まで行うかについては今後の課題である。

以上の作業をすべて行った結果、図 3.16 のような約 2400 台の車両走行軌跡図が得られた。ただし、図中、下方が上流方向を、上方が下流方向を表しており、車両は図の下から上に向かって流れることとなる。

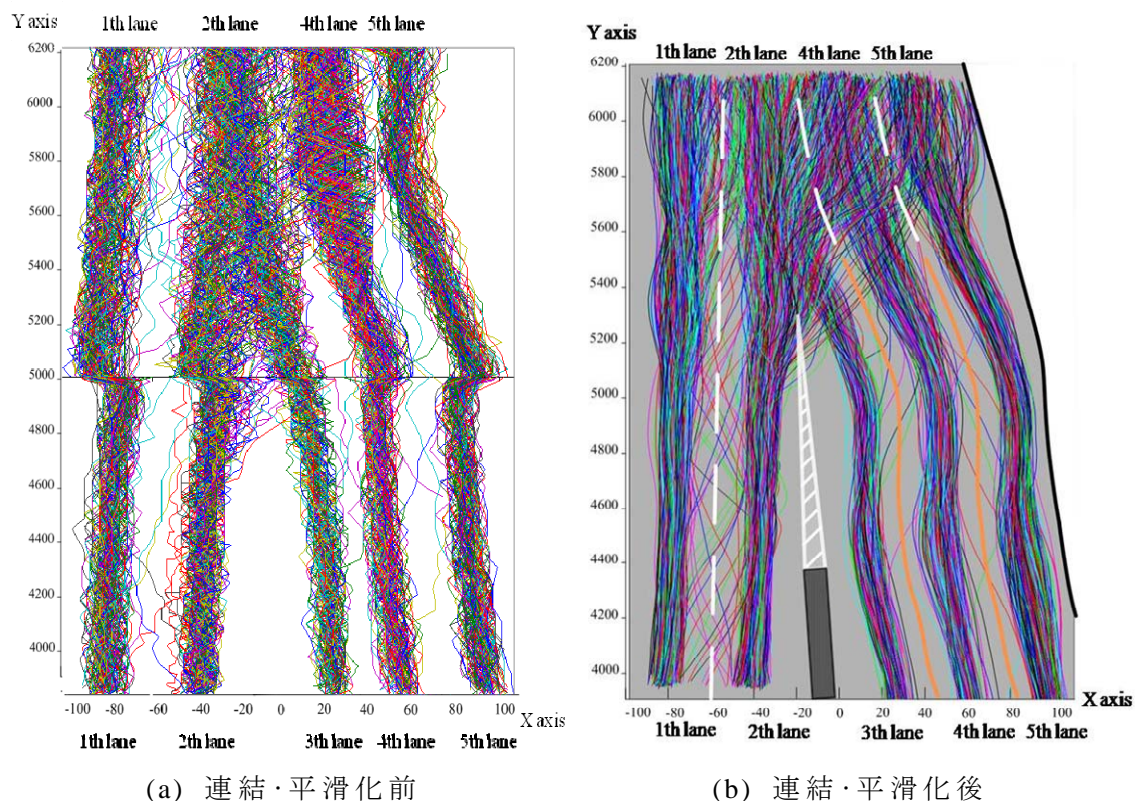


図 3.16 連結・平滑化の効果

3.4 結論

本研究では画像観測データからの車両軌跡の抽出方法において、最も精緻な車両軌跡が得られる目視観測データを主に分析データとして利用するが、目視観測データを抽出する過程には数多くの重要な点がある。まず、目視によるデータ観測者のデータ抽出への厳格な姿勢が必要となる。目視とはいえ、オクルージョンや路面反射による観測誤差、車両の検知ミスなどは生じることを前提に、根気よくやり直し、正確な観測を続ける観測者の意思が重要となる。そのために、目視観測調査の管理者は、観測者の選定からデータの意義や重要性、観測方法の理解への徹底などを図らなくてはならない。また、目視観測で得られた元データは、ビデオ画像撮影地点の現地座標を参照して、分析可能となるため、ビデオ撮影カメラ内、カメラ間の現地座標の正確さは、目視観測データの利点を支える重要な検討項目である。

参考文献

- [1] 洪多禧，宇野伸宏，倉内文孝．“画像データを用いた車両追従挙動への影響要因に関する基礎的分析”，第 28 回交通工学研発表会論文報告集，2008.
- [2] Akahane, H.and Hatakenaka, S. “Successive observation of trajectories of vehicles with plural video cameras”, *International Journal of ITS Research* 2 (1), pp. 47–53, 2004.
- [3] Banks, J. “Freeway speed-flow-concentration relationship: More evidence and interpretation”, *Transportation Research Record* 1255, pp.53-60, 1989.
- [4] Bando, M., et al, “Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation”, *Physical Review* E51, 1995, pp.1035-1042.
- [5] Ediel, L.C. “Discussion of traffic stream measurements and definition”, *Proc. of the 2nd International Symposium of the Theory of Road Traffic Flow. London*, pp.139-154, 1963.
- [6] Higatani, A., Kurauchi, F. and Iida. Y. “Research on traffic observation by video camera”, *Proc. of the 59th annual conference of Japan Society for Civil Engineers*, pp.713 -714, 2004.
- [7] Hong, D.H., Uno, N. and Kurauchi, F. “Empirical analysis of driver’s Car following heterogeneity based on video image data”, *The Twelfth International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, pp.401-410, 2007.
- [8] Hong, D.H., Uno, N. and Kurauchi, F. “Heterogeneity in multi-anticipative car-following behavior by video image data”, *International Journal of ITS Research*, Vol. 7, No. 1, Special issue, 2009.
- [9] Kurauchi, F.,Iida. Y., Queiroz, I. and Shimada, H. “Verification of macroscopic traffic flow characteristics around bottleneck”, *Proc. of the 4th International Summer Symposium, Kyoto*, pp.323 -326, 2002.

第 4 章 運転者間の異質性を考慮した 車両追従挙動分析

4.1 概要

運転者の行動は、交通事故や交通渋滞などのさまざまな交通問題に影響を及ぼしており、このような問題の発生メカニズムの理解に基づき、対処するためには運転者の行動実態及び特性を理解する必要がある。言い換えれば、運転者の行動実態及び特性を理解することは、道路交通システムの評価を行い、交通運用の改善方策を策定する上で重要な役割を果たす。近年では、交通の安全性や効率性を指向する Intelligent transport systems(ITS)の導入によって、運転者の行動の分析・把握の重要性が増加して来ている。現在、道路運営において ITS 概念の一環で Advanced Cruise Control(ACC) system, Advanced Vehicle Control and Safety System(AVCSS), Advanced Traveler Information System(ATIS)など、安全性の観点から車両操作を補助支援したり、運転者にリアルタイム情報を提供するための ITS 技術は早くから開発されて来ているのに比べて、運転者行動の分析・把握を目的とした ITS 技術及びシステムはあまり多くは存在せず、これに対する新しいシステムの開発と効果の評価方法が要求されている。運転者行動に関する一つの主要研究分野としては、車両追従挙動に着目した動的な運転者の行動に対する分析・研究が 1960 年代から増えている。また、交通事故ならびに渋滞などの交通問題は社会的な影響も大きい一方、その根本原因の一つは運転者の挙動にあると考えられるため、道路マネジメントの観点で運転者の行動を考慮した各種の対策やこれを評価することができる方法に焦点が当てられている。このため、交通流特性をマクロな観点ではなくミクロな観点で分析し、とりわけ運転者行動・車両挙動を理解することが必要とされている。

本研究で車両挙動を観測している道路の合流部については単路部と比較して、より大きな運転負荷がドライバーに生じることとなる。そのため合流部では、車両間のコンフリクトが増加し合流摩擦が生じるため、追突ならびに車両接触などの事故、合流部を起点とする渋滞が発生することが多く、交通安全性および効率性の点で多様な問題が起こりやすい。道路ネットワークの安全性・効率性の改善の観点からも、合流部のマネジメントは重要であり、各

種の改善策を効率的に評価するための方法が必要となる．とりわけ合流部では車両の進行方向のみならず，横断方向の車両の動きが重要であり，このことが合流部の種々の問題を引き起こす原因となっている．合流部での車両の挙動を進行方向と横断方向の調整過程としてとらえた場合，このような挙動の分析・モデル化を進めるためには，車両挙動を観測した軌跡データが必要となる．

本章では運転者行動(追従行動，合流行動（合流ギャップ選択行動），追い越し行動，車線変更行動)の中で，一番基本的な行動である追従行動（車両追従挙動）に注目した．運転者の追従行動は基本的に同じ車線の前方車両の行動に応じて行動を決める行動として，前方車両との衝突リスクを回避しつつ安全性を維持するために適切な距離を確保するよう，運転者が減速と加速を行い車両挙動に対して調整する行動を意味する．このような運転者の追従行動を分析するためには，追従過程及び挙動を説明することができるミクロ的な車両挙動データが必要である．近年は，コンピュータによるシミュレーション技術の発達に伴って，ミクロな運転者挙動モデルの開発・精緻化に対するニーズも高まってきている．

本研究では第3章で提示したように，ビデオ画像データから時系列的な車両挙動を観測した車両軌跡データを抽出した．抽出したこの車両挙動データを利用して，都市高速道路への合流部を含む全区間に対する運転者の追従行動を分析する．これまで，追従挙動に関する既存の研究は，追従挙動を簡単な微分方程式として記述して，解析解ならびに数値解を求め，その安定性を検証する様な研究が多く，実フィールドのデータを用いる場合も，テストコース上の走行データを用いて追従モデルのパラメータ推定を行う様な研究が大部分であった．本研究では，多くの既存研究とは異なり，合流区間を含む一定の距離を持つ区間での多種多様な運転者行動・車両挙動を分析・理解するために，ビデオ画像データから抽出した 0.2 秒ごとのミクロ的車両軌跡データを利用して，実際の交通条件・道路条件を反映させた形で，運転者の追従行動を分析した．特に，追従行動に対する運転者間の異質性及び追従行動に影響を及ぼす要因に対しても分析を行った．

4.2 追従車両の定義及び抽出

運転者の追従行動は基本的には前方車両の挙動に応じて，走行安全性の維持のため，追従車側が加速，減速をすることで適切な車間距離を維持する行動を意味する．このような運転者の追従行動を分析するため，先に合流区間を含む本対象区間での追従車両を定義する．本研究での「追従車両」は，大口・

片倉(2001)論文に提示された車群の定義を用いて‘同一車線上を走行している車両の中で、前方車両との車尾時間幅が3秒以内である車両’として定義する。また、追従車両と前方車両との追従関係が終わる状況を3種類に分けて、この状況を満足すると追従関係は終了と定義する。追従関係の終了状況は

- 1) 追従車両の前方車両が車線変更する場合
- 2) 追従車両が車線変更する場合
- 3) 前方車両との車尾時間が3秒より大きくなった場合

とする。

また、周辺交通環境や物理的条件の影響によって、追従車両の運転者の走行挙動は十分に変わる可能性がある。よって本研究では、周辺交通環境及び物理的条件の差異が追従行動に影響を及ぼす要因を分析するために、追従車両のデータを2種類の追従データセットに分類して追従行動を分析した。まず、追従データセット1の追従車両は、運転者間の追従行動の変化を分析するため、運転者ごとに全分析区間を走行した追従車両を対象とした。追従データセット1の場合は各追従車両の運転者ごとに前方車両を20秒以上追従しており、これを満足する追従車両は520台存在する。また、区間の特性（主に平面線形・構造特性）が追従行動に及ぼす影響を考慮するため、追従データセット2の場合は、図4.1に示すように、全体区間を区間特性によって3区間（直線区間、カーブ区間そして合流区間）に分類した。よって、追従データセット2では前方車両を追従する追従時間は約8秒以上であり、これを満足する追従車両は全体2,283台存在する。

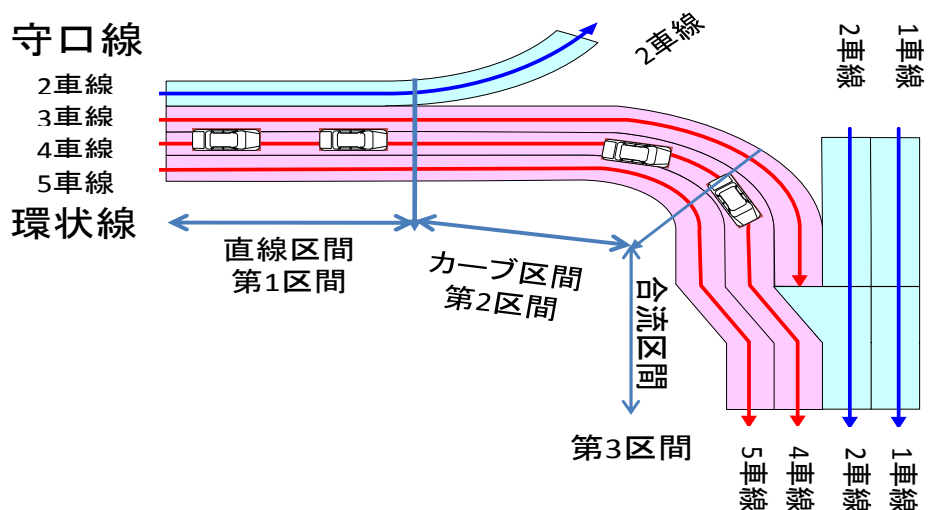


図 4.1 区間特性による対象分析区間の直線，カーブ及び合流区間の分類

表 4.1 にも示すとおりに，追従データセット 1 で抽出された追従車両は追従時間が‘20 秒以上’と長く，これを満足する追従車両の大部分は図 4.1 の環状線（赤い部分）を走行する車両で構成されている．追従データセット 1 の追従車両は全区間を走行した追従車両なので，このデータを利用して運転者間の追従行動の差違を分析することが可能である．一方，追従データセット 2 の場合は，主に平面線形・構造面から区間分割し，周辺交通環境，走行車線そして区間特性等の物理的条件が，運転者の追従行動に及ぼす影響を分析するために活用可能である．本研究では，追従データセット 1 とデータセット 2 を用いた車両追従モデルを推定し，運転者間異質性と周辺交通環境及び物理的条件による運転者ごとの追従行動の変化について分析した．

表 4.1 追従挙動分析のための追従データセットの分類及び特性

追従データセット 1 追従時間が 20 秒以上の車両(N=520)	追従データセット 2 追従時間が 8 秒以上の車両(N=2,283)
<ul style="list-style-type: none"> ・ 運転者ごとに全対象分析区間を走行する車両 ・ 抽出された追従車両の大部分は環状線を走行する車両 ・ 同一運転者間追従行動の変化に対する分析が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 道路特性を考慮するため，全分析区間を直線区間，カーブ区間，合流区間に分類 ・ 周辺交通環境(交通密度)，道路の物理的条件(車線，区間特性)が追従行動に及ぼす影響の分析が可能

4.3 車両追従モデル

4.3.1 車両追従モデルの概要

本研究では守環合流部における車両の追従行動を分析するため，第 2 章で提示した車両追従モデルの中で，GM モデルと Helly モデルを選択した．基本的にこれらのモデルは追従車両と前方車両との相対関係を「刺激(stimulus)」として，追従車両の加速度が刺激に対する反応(response)として出力されると仮定して，追従車両の行動を説明するモデルである．選択されたモデル群は，後述する様に既存の車両追従モデルの中で，モデルの構造が比較的簡単で推定パラメータの物理的な意味の解析も容易なものである．したがって，本研究では GM モデルと Helly モデルを利用して推定したパラメータで対象分析区間での車両の追従行動の変化を分析する．

(1) GM モデル(General Motors model)

GM モデル(Gazis, Herman and Rothery, 1961)は追従車両の速度, 前方車両との相対速度, そして相対距離を利用して, 前方車両と追従車両間の追従関係を説明するモデルである. このモデルでは, 一定の反応時間(time lag, T)の後, 追従車両の加速度(\ddot{x}_{n+1})が追従車両の速度(\dot{x}_{n+1})と前方車両との相対速度($\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}$)に応じて決定されるとの構造を有している. また, 車頭(車尾)距離($x_n - x_{n+1}$)の大きさ, ならびに, 自車速度の大きさにより刺激(相対速度)に対する追従車の感度に変化するという関係を仮定しており, 非線形構造を仮定している.

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \alpha \frac{\{\dot{x}_{n+1}(t)\}^m}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} \cdot [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad \text{式 4.1}$$

ここで,

$\ddot{x}_{n+1}(t+T)$: 追従車両の加速度(m/s^2), $\dot{x}_n(t)$: 前方車両の速度(m/s), $\dot{x}_{n+1}(t)$: 追従車両の速度(m/s), $x_n(t)$: 前方車両の位置(m), $x_{n+1}(t)$: 追従車両の位置(m), α, m, l : 推定パラメータ, T : 反応時間(sec)

である.

(2) Helly モデル

Helly モデル(Helly, 1959)は前方車両との相対速度と相対距離(車頭距離)を刺激として一定の反応時間(time lag)の後, 追従車両の加速度を刺激に対する反応として出力する構造を仮定するモデルであり, 刺激と線形関係で表現する追従モデルである. このモデルは現実的な追従行動を表現するため, 希望(車間)距離(Desired distance)を導入して, 希望(車間)距離と相対距離との乖離が, 追従車両の加速度すなわち追従行動の変化に影響を及ぼす構造を持っている.

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = C_1[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + C_2[x_n(t) - x_{n+1}(t) - D_n] \quad \text{式 4.2}$$

ここで,

$\ddot{x}_{n+1}(t+T)$: 追従車両の加速度(m/s^2), $\dot{x}_n(t)$: 前方車両の速度(m/s), $\dot{x}_{n+1}(t)$: 追従車両の速度(m/s), $x_n(t)$: 前方車両の位置(m), $x_{n+1}(t)$: 追従車両の位置(m), D_n : 希望距離(Desired distance, m), C_1, C_2 : 推定パラメータ, T : 反応時間(sec)

である.

4.3.2 モデルの推定方法

本研究では先に提示した追従データセット 1, 2 を利用して, GM モデルならびに Helly モデルのパラメータを推定し, 追従行動に見られる運転者間の差違, ならびに, 追従車周辺の交通環境や道路線形等の物理的条件による追従行動の変化を分析しようとする. そのため, 本研究で推定する追従モデルについては, 運転者ごとのパラメータの変化を調査する必要がある. したがって, 全データをプールして推定する一つの統合的な追従モデルではなく, 各追従車両 (また運転者) 別追従モデルを構築することとする.

(1) GM モデル(General Motors model)

GM モデルは, 先述の通り前方車両との相対速度を刺激, 追従車の反応遅れ後の加速度を反応として, 刺激に対する感度が車頭距離ならびに自車速度により調整されるという非線形構造を仮定して, 前方車両に対する追従車両の追従行動を説明している. GM モデルに含まれる推定パラメータとしては, (α, m, l, T) の 4 種類があるが, これらを同時に推定することは難しい. したがって, 本研究ではパラメータ m, l, T をあらかじめ妥当な範囲の値で順次変化する様に設定した後, 最小二乗法で各追従車両別にパラメータ (α) を推定した. また, 個別車両毎に推定したパラメータのうち, 追従モデルの決定係数 (R^2) の値が一番高いモデルのパラメータを, 本研究では最適なパラメータとして分析対象として選択した.

まず, パラメータ l, m は既存研究文献¹¹⁾で提示されたパラメータの値に基づく定数値として 0~3 の値を持つと仮定した. また, 反応時間 (T) は観測時間の 0.2 秒間隔で増加することで 0.2~3.0 秒の範囲に設定した後, 最小二乗法を利用してパラメータ α を推定した. つまり, GM モデルのパラメータ l, m は 0~3 の定数値として各 4 ケース (e.x. $(l, m = 0, 0), (l, m = 0, 3)$) を, また反応時間は 0.2~3.0 秒で観測時間 0.2 秒ごとに 15 ケースの範囲を持つようになる. よって, 追従車両ごとに計 240 個のパラメータ l, m, T の組み合わせ (例えば $(l, m, T = 0, 0, 1.2), (l, m, T = 1, 3, 0.8)$) からパラメータ α を推定して, この中で決定係数が一番高いパラメータの組み合わせを持つモデルを, 最適モデルとして求めた.

(2) Helly モデル(Helly Model)

Helly モデルは GM モデルとは異なり, 追従モデルが線形関係で構成されているので, パラメータ C_1, C_2 を同時に推定することが可能である. また, 希望 (車間) 距離 (Desired distance) は希望距離算定式によってあらかじめ算定することが可能であるが, 本研究ではすべてのパラメータ (C_1, C_2) と希望

距離を同時に推定するため、希望距離と他のパラメータとの関係を利用して、一度にパラメータを推定する方法を利用した。すなわち、式 4.2 のパラメータ C_2 と希望（車間）距離 (Desired distance) との関係を利用し、パラメータ C_3 ($C_3 = C_2 * D_n$ desired distance) で置いて、パラメータ C_3 と C_2 の推定結果を用いて希望距離 (D_n) を算出した。

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = C_1[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + C_2[x_n(t) - x_{n+1}(t)] + C_3 \quad \text{式 4.3}$$

したがって、相対速度と相対距離で追従車両と前方車両との関係を説明するパラメータ C_1, C_2, C_3 を最小二乗法で追従車両ごとに推定した。推定の際、反応時間は GM モデルと一緒にあらかじめ 0.2 秒ごとに 0.2~3.0 秒まで設定し、推定したパラメータの中で決定係数が一番高いモデルを最適モデルとして、最適モデルのパラメータ C_1, C_2, C_3 と反応時間 (T) を求めた。

4.4 追従車両モデルのパラメータ推定及び基礎分析

本節では、分析対象区間全域における各追従車両別のパラメータを推定するため、追従データセット 1 を用いて前出の GM モデル、Helly モデルのパラメータを 4.3 節で述べた方法により推定した。各車両別に推定したパラメータの組み合わせの中で、決定係数が一番高いモデルを追従車両別最適モデルとして選定する。本節では分析の信頼性を保つため、決定係数が 0.5 以上になる追従車両モデルのみを分析に利用した。以下では、各追従車両の最適モデルのパラメータと反応時間に対する推定結果を示し基礎的な考察を加える。

4.4.1 個別モデルのパラメータ推定結果

ここでは、後の分析・考察を簡明なものとするため、より多くの追従車に適合する GM モデルのパラメータ l, m の組み合わせを選択し、同一の追従モデルの構造を仮定した上で、車両間の追従挙動の差などについて分析することとする。GM モデルとしての分析対象パラメータ l, m を選定するため、各追従車両に対するパラメータ l, m, T の組み合わせごとに決定係数が一番高い最適モデルの頻度を比べることとする。よって、追従データセット 1 を利用して、追従車両ごとに決定係数が最大となるパラメータ l, m の組み合わせに対する頻度を比較した。GM モデルのパラメータ推定の結果、追従車両 520 台中に決定係数が 0.5 以上の追従車両は 285 台存在しており、この追従車両に対する頻度分析結果は多様なパラメータ l, m の組み合わせの中で、最適モデルの頻度が、図 4.2 のように $(l, m) = (0, 0), (0, 3)$ そして $(3, 3)$ で多くなる結果と

なった．このようなパラメータの組み合わせが多様に存在する理由は，簡単な構造を持った GM モデルでも運転者間追従行動の異質性が存在するからであると推察される．

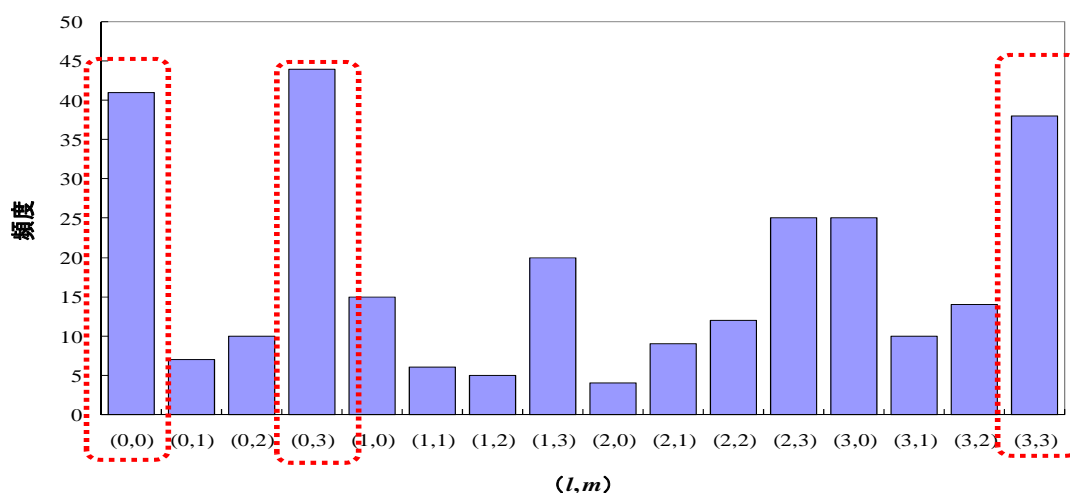
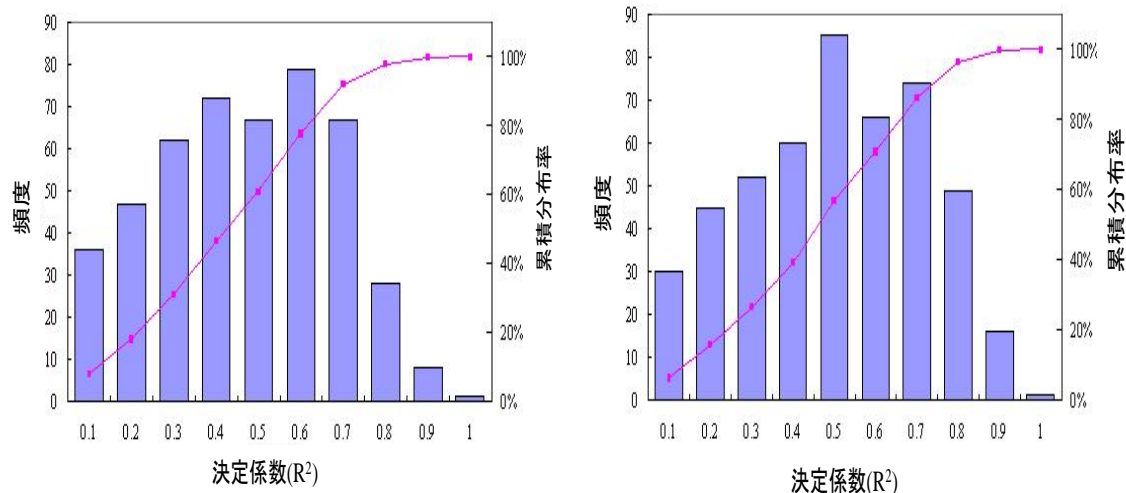


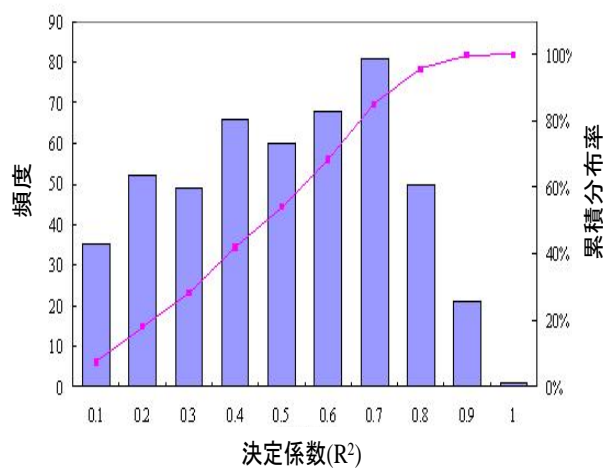
図 4.2 GM モデルでパラメータ l, m の組み合わせごとの最適モデルの頻度

GM モデルの刺激（相対速度）に対する感度は，先行車との車頭（車尾）距離，ならびに，追従車の速度の影響を受けると想定している．この感度はここで着目しているパラメータ l, m の値によって影響を受け，その結果パラメータ α の推定値にも影響を及ぼすので，ここでは，一つのパラメータ l, m の組み合わせを選択し，その下でパラメータ α の分布に着目して分析する．したがって，3 個のパラメータの組み合わせの中で，どの組み合わせがモデルとしてより再現能力を持つかに対する検証が必要である．よって，本研究ではパラメータ l, m の 3 個の組み合わせ $(l, m) = (0, 0), (0, 3)$, そして $(3, 3)$ に対し，GM モデルを推定した結果を利用して，その決定係数 (R^2) の分布を比べた．分析の結果，図 4.3 のようにパラメータ $(l, m) = (0, 0), (0, 3), (3, 3)$ の組み合わせを仮定すると，決定係数 (R^2) 値の累積分布は類似の形状を有していると考えられ，3 種類のモデルは，皆同程度の説明力を持っていると判断できる．また，決定係数の値が 0.5 を追従モデルの説明力の基準値と仮定した場合，0.5 以下の追従車両は全体の約 40% となり，GM モデルが本対象区間の追従車両の挙動のうち 60% 程度説明することができる可能性が示唆されている．



(a) $(l, m) = (0, 0)$

(b) $(l, m) = (3, 3)$



(c) $(l, m) = (3, 3)$

図 4.3 決定係数(R^2)の分布(GM モデル)

Helly モデルについても GM モデルに適用した方法と同様に、追従データセット 1 の 520 台の追従車両に対して、決定係数が最大となる最適モデルを選定する。Helly モデルの場合、外生的に与えるべきパラメータは、反応時間 T となる。すなわち、最適モデルとは決定係数が最大となる反応時間 T を持つ、追従モデルとなる。ここでは各追従車にとっての最適モデルの決定係数に着目し、その累積分布を図 4.4 に示す。分析の結果、決定係数が 0.5 以上の全追従車両 520 台中で 422 台に上り、決定係数の値が 0.5 以下の追従車両は全体の約 20%にとどまった。GM モデル同様に、決定係数 0.5 をモデルの説明力を判断する基準と仮定すると、Helly モデルは本対象区間の追従車両の挙動を 80%程度説明可能であることが分かる。

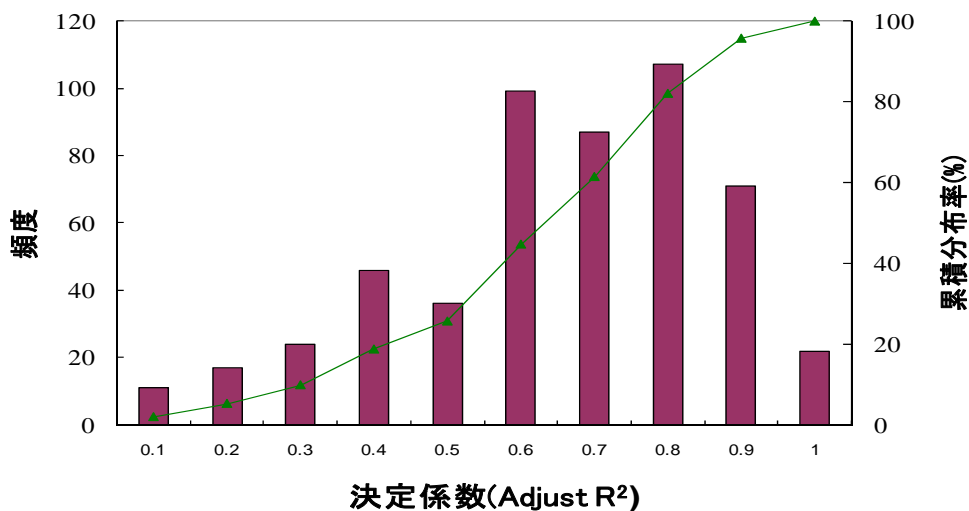


図 4.4 Helly モデルに対する決定係数(Adjust R²)の累積分布

4.4.2 扱各車両追従モデルの決定係数と反応時間の比較

先に記述したように、追従データセット 1 を用いて GM モデル、Helly モデルで各追従車両別に決定係数が一番高いモデルを最適追従モデルと仮定して、それぞれの車両ごとに追従モデルのパラメータと反応時間を推定した。分析結果から、本節では対象区間の車両の追従挙動を一番よく説明するモデルを選定するために、各車両の追従モデルごとの決定係数の値と反応時間を比較分析した。

先に述べたように、追従モデルとして GM モデルを仮定した場合、図 4.2 と図 4.3 に示すように、最適モデルの頻度が高いパラメータ(l, m)の組み合わせ、すなわち(l, m)=(0,0),(0,3),(3,3)は、モデルの決定係数から判断して、同程度の説明力を有するものと推察された。ここでは GM モデルと Helly モデルの説明力を、主に決定係数の点から比較するため、GM モデルとしての最適モデルとしての採択頻度が高く、最も簡単な形態であるパラメータ(l, m)=(0,0)を仮定した GM モデルを比較対象として選択する。

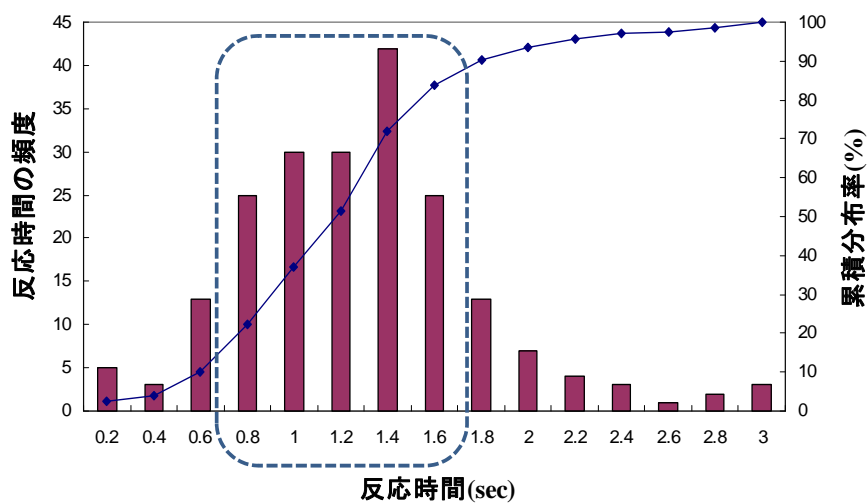
この議論を踏まえて、(l, m)=(0,0)の GM モデルと Helly モデルの決定係数の分布から、各モデルの説明力を比較分析する。先にも述べたが、GM モデルの場合は図 4.3 のように決定係数が 0.5 未満である車両は、全体の追従車両の約 40%であったが、Helly モデルの場合は図 4.4 に示したとおりに、約 20%の追従車両のみが決定係数の値が 0.5 未満であることが明らかとなった。言い換えれば、決定係数 0.5 をモデル説明力の基準と仮定した場合、GM モデルの場合は全体追従車両の挙動の約 60%を説明することができるのに比べ

て、Helly モデルを適用する場合は本対象区間の追従車両に対する挙動の約 80%を説明することができることを意味する。したがって、520 台分の追従データセット 1 を対象とした場合、Helly モデルが GM モデルより相対的に高い説明力を持つと考えられ、本対象区間の追従車両の挙動をよりよく説明すると判断できる。このことを踏まえて、4 章の以後の議論では、追従モデルとして Helly モデルを仮定し、その推定パラメータに基づき、追従挙動に関する分析・考察を深める。

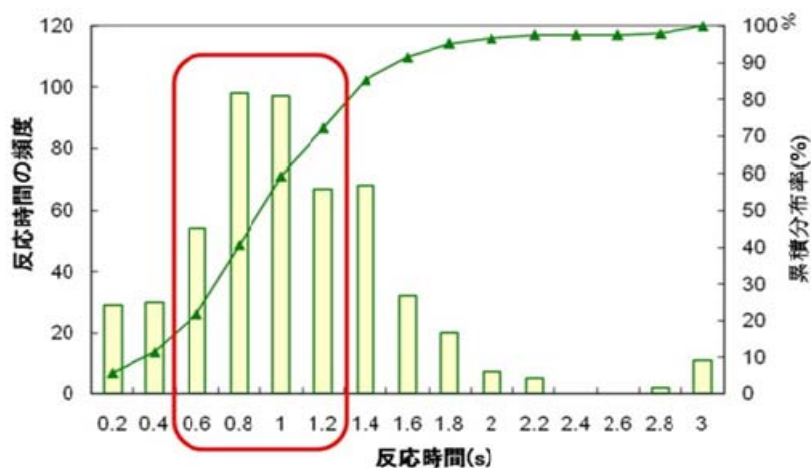
加えて、GM モデルと Helly モデルの最適モデルに対する反応時間の分布についても比較した。分析の結果、図 4.5 のように GM モデルの場合は大部分の追従車両が 0.8~1.6 秒の反応時間を持ち、平均反応時間は 1.2 秒となった。これに対して、Helly モデルの場合は大部分の追従車両の運転者が前方車両の挙動に対して 0.6~1.2 秒の反応時間を伴い追従するとの推定結果が得られ、平均反応時間は 0.8 秒であった。推定結果見ると、Helly モデルの方が GM モデルより反応時間が短いことが分かる。また、表 4.2 で車両追従挙動に関する研究で提示された反応時間と本研究で得た Helly モデルと GM モデルでの反応時間を比べた。この結果、GM モデルより Helly モデルで得た反応時間が、他の研究と類似な値を持つことをわかった。もちろん、このような分析結果で、Helly モデルが GM モデルより本対象区間の追従車両の動きをもっと表現すると断言はできない。しかしながら、他の研究結果に類似な値を持つ Helly モデルが GM モデルに比べてもっと現実的な反応時間を持って、Helly モデルでこの反応時間後の追従挙動についてもっと現実的に説明できるということが予想させる。

表 4.2 車両追従挙動に関する他の研究での反応時間

研究	反応時間 (sec)
Chandler et al.,(1958)	0.17~0.74sec
Herman&Potts(1959)	平均 1.2sec
Heyes and Ashworth(1972)	平均 0.8sec
Kometani and Sasaki(1959)	平均 0.75sec
Helly(1959)	0.5sec
Hanken and Rockwell(1967)	2sec
Bekey et al.,(1977)	0.1sec
Xing(1995)	0.83sec
Michaels(1963)	1sec
Evans and Rothery(1973)	1sec
Kikuchi et al.,(1992)	1sec



GM モデルの反応時間



Helly モデルの反応時間

図 4.5 GM および Helly モデルの反応時間

4.4.3 Helly モデルの推定パラメータの吟味

本研究では各車両の追従挙動を分析するため、対象区間の挙動分析のために選択した Helly モデルについて、そのパラメータ推定 C_1 , C_2 の存在範囲を調べた。一般的に、式 4.2 の Helly モデル式において、相対速度の影響を表現する右辺の第 1 項に対して、前方車両との相対速度の符号が正(+)に（先行車が追従車より相対的に速く）なる場合は追従車両が加速して、負(-)の符号の（先行車が追従車より相対的に遅くなる）場合には追従車が減速するという追従挙動が期待される。よって、相対速度との関係を表すパラメータ C_1 の符号が正

(+)となる，追従車両が多いことを予想することができる．また，右辺第2項の相対距離と希望距離との差の影響を表現する項については，前方車両との相対距離が希望距離より大きければ追従車両は加速して，小さければ減速する可能性が高いので，相対距離と希望距離との差の関係を表現するパラメータ C_2 の符号がについても正(+)の符号を持つ追従車両が多いと期待される．

これをふまえて実際に，本対象区間の追従車両データを利用して，追従車両の推定パラメータ C_1, C_2 の存在範囲を分析した．分析の結果，表 4.3 のようにパラメータ C_1 の符号が負(-)の場合は，その発生件数が全体の約 1.2%と非常に小さいことが確認されたため，これを本分析から除くこととした．パラメータ C_1 の符号が(+)になる残りの場合のうち，パラメータ C_1, C_2 の符号が(+,+)になる車両は全体の 72%で大多数を占めることが判明した．その一方，パラメータ C_1, C_2 の符号が(+,-)になる車両も，全体の約 27%を占めることが明らかとなった．

表 4.3 Helly モデルのパラメータ C_1, C_2 の存在範囲及び分類

パラメータの範囲	分類	符号	頻度	構造比率(%)
$C_1: -0.196 \sim 0.902$	1	$C_1: -, C_2: -$	3	0.6%
	2	$C_1: -, C_2: +$	3	0.6%
$C_2: -0.311 \sim 0.244$	3	$C_1: +, C_2: -$	123	26.7%
	4	$C_1: +, C_2: +$	391	72.1%
計			520	100%

本研究では，先行車との相対距離ならびに相対距離と希望距離との差異が，追従車の加減速に及ぼす影響についての一般的な期待と異なり，パラメータ C_1, C_2 の符号が(+,-)となる追従行動，すなわち前方車両との相対距離が大きいほど追従車両が大きく減速するという追従挙動が発生する理由を説明するため，次のような仮説を立てた．

仮説：区間特性(カーブ,合流区間)が追従車両の反応(加速度)に影響を及ぼす

仮説を証明するために，本研究ではパラメータ C_1, C_2 の符号が(+,-)となる追従車両に対して，前方車両との相対距離と追従車両の加速度との関係，ならびに，平面線形で分類した区間（直線，カーブ，そして合流区間）別の推定パラメータ C_1, C_2 の出現頻度を分析した．

前方車両との相対距離と追従車両の加速度との関係を分析した結果，図 4.6 に示した 1 台の追従車両の例を見れば，追従車両は前方車両との相対距離に

かかわらずカーブ区間及び合流区間で減速する傾向があることが判明した．これはカーブ及び合流区間で走行する追従車両中で，前方車両との相対距離にかかわらず区間の特性に影響を受けて減速する運転者が存在する可能性が高いということを意味する．

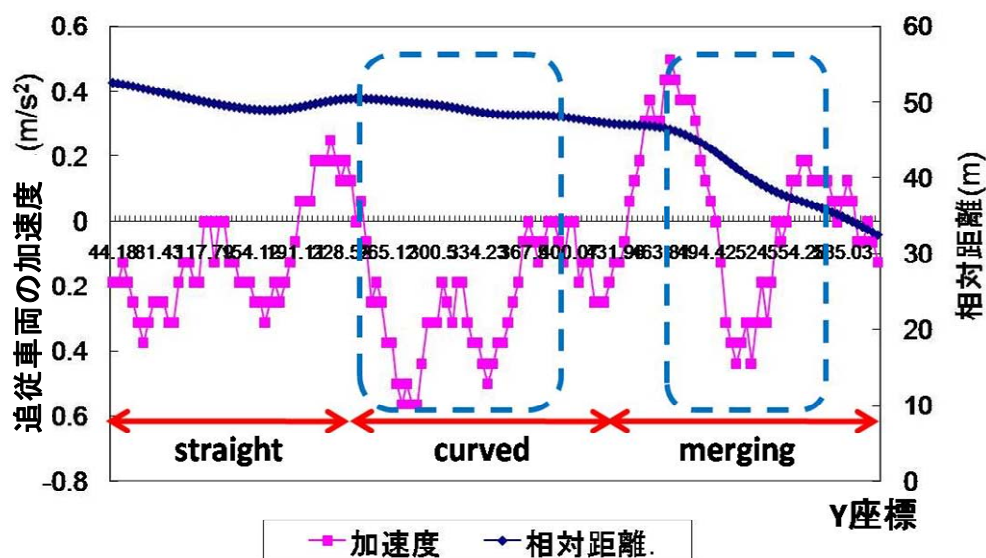


図 4.6 区間特性と追従車両の加速度間の関係

このような結果に基づいて，追従データセット 1 の追従車両 520 台を区間別で再分類（全体：1,396 台）して，パラメータ C_1, C_2 の符号の区間別出現頻度及び構成比率を調べた．この結果，図 4.7 のように直線区間の場合はパラメータ C_1, C_2 の符号の構成比率は(+,+)が相対的に高いとの結果が現れたが，カーブ区間及び合流区間の場合には直線区間に比べて，符号が(+,-)となる追従車両が相対的に多いことが分かる．図 4.6 及び図 4.7 の分析結果から，道路線形面での区間特性が追従車両の追従挙動に影響を及ぼす可能性があるということが見られる．また，相対距離の多様さにかかわらず区間特性の影響を受けて追従車両が減速するという車両挙動は，追従挙動において運転者間の異質性が存在する可能性があることを示唆している．

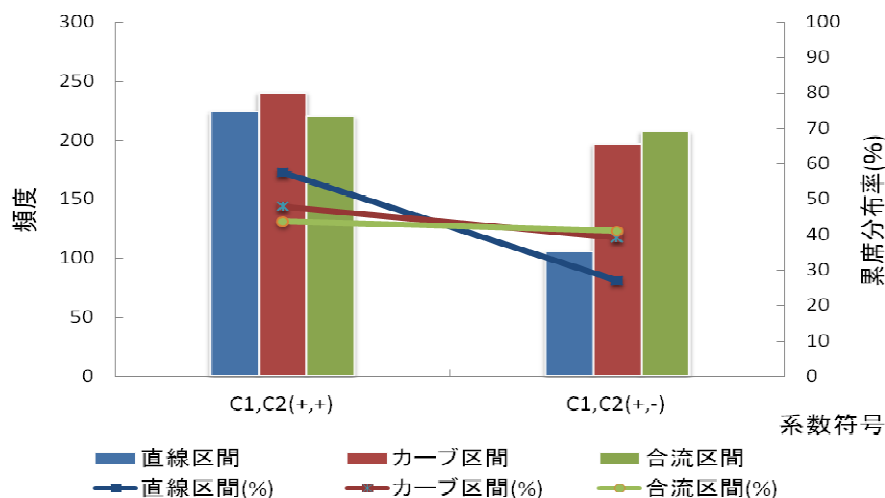


図 4.7 Helly モデルにおける区間別パラメータ C_1, C_2 の符号の出現頻度及び構造比率

したがって、Helly モデルの推定パラメータ C_1, C_2 の符号が $(+, +)$ となる追従車両だけではなく、 $(+, -)$ となる車両も含むことで、本分析区間の車両の追従挙動をよく表現できるものと考えられる。よって、本研究ではパラメータ C_1, C_2 の符号が $(+, -)$ となる追従車両を含み、運転者間の追従挙動の差異、すなわち追従行動の異質性と周辺交通環境及び物理的条件による運転者の追従挙動の変化について分析する。

4.5 推定パラメータに基づく運転者間の異質性の分析

4.5.1 推定パラメータの分布

本研究では運転者間異質性と周辺交通環境及び物理的条件による運転者の追従行動変化を調べるため、追従データセット 1 を利用して推定パラメータ C_1, C_2 、そして反応時間 T の存在範囲及び分布状況に着目して分析する。先に提示した通り、一般的に Helly モデルではパラメータ C_1, C_2 の符号が $(+, +)$ となることが期待されるが、本研究の分析対象区間のデータを用いた場合、符号が $(+, -)$ となる場合も約 27% で含まれており、パラメータ C_2 の符号が $(-)$ の場合を含む運転者間の異質性及び道路交通環境の追従行動への影響に関して分析した。

Helly モデルにより追従挙動を表現するとした場合、運転者間での異質性を分析するため、推定パラメータ C_1, C_2, C_3 、そして反応時間 T の頻度及び累積分布を調べた。図 4.8 を見れば、パラメータ C_1, C_2, C_3 とともに分布しており、

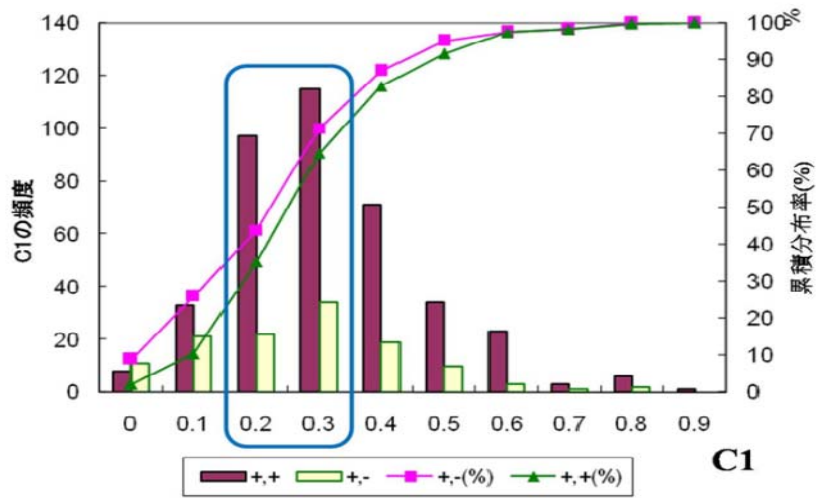
特に C_1 の散らばりが大きくなる傾向にある．このことから追従挙動において運転者間の異質性が存在する可能性があると考えられる．

相対速度の感度を表現するパラメータ C_1 は 0.2~0.4 の値に集中しているのに比べて，相対速度と希望距離との関係を表現するパラメータ C_2 の場合には，大部分が 0~0.05 の値に分布していることが分かる．また，希望距離を表すパラメータ C_3 は負の値から正の値まで様々に分布されているし，パラメータ C_2 の関係でから希望距離を算定した結果，大部分の追従車両が 10~40m の希望距離を持つことで現れた．パラメータ C_1, C_2 間分布傾向を比較すると，パラメータ C_1 が C_2 より値が大きくて，分布幅も広く分布する傾向があることが明らかとなった（ここで，パラメータ C_3 はパラメータ C_2 に影響を受けて決まるので，他のパラメータとの比較から除いた）．

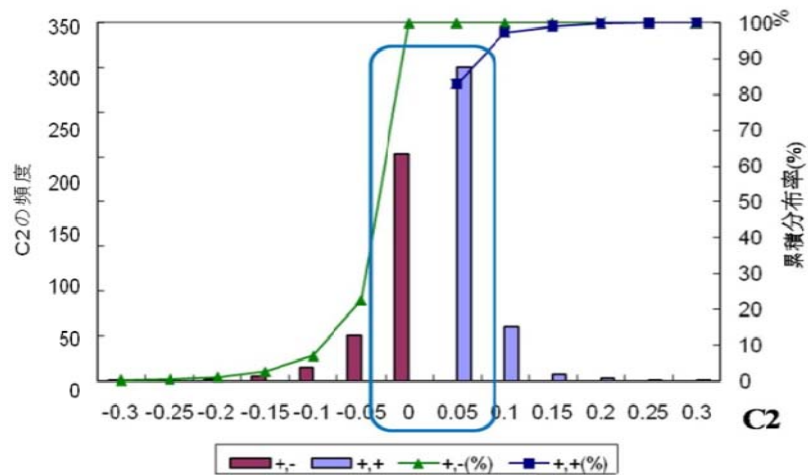
また，相対速度と相対距離に対する運転者の反応を分析するため，本研究ではパラメータ C_1, C_2 が追従車両の加速度に占める影響力を比べた．これのために，図 4.8 でパラメータが最も集中されて分布した最頻値うちで一つの値を選定した．つまり，パラメータ C_1 は 0.3，パラメータ C_2 の場合では 0.05 で選定し，このパラメータによる Helly model は下のようになる．

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = 0.3[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + 0.05[x_n(t) - x_{n+1}(t) - D_n]$$

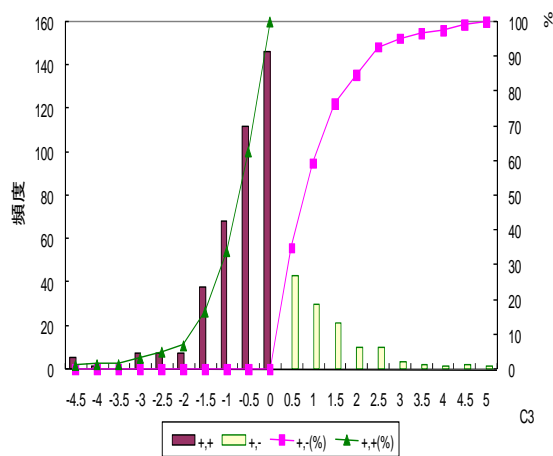
ここで，もし相対速度が 5m/s，相対距離が 10m，そして希望距離が 20m で仮定すれば，基本的に追従車両の加速度は 1m/s^2 になる．ここで，相対速度のみが 1m/s 増加するようになったら，追従車両の加速度は 1.3m/s^2 になるが，反対に相対距離だけが 1m/s が増加なれば，追従車両は 1.05m/s^2 の値で加速する．この結果で，追従車両の加速度は相対距離より相対速度によって，もっと大きい変化量が現れることをわかった．それに追従車両の加速度は相対速度の方にもっと大きい影響を受けて走行することを考えられる．したがって，追従車両の加速度と相対速度，相対距離に対する線形関係を持っている Helly モデルを考慮した時，追従車両の運転者は相対距離よりも相対速度により敏感に応じて追従することを予想できる．また，上で記述した通り，パラメータ C_2 が負(-)になる追従車両もかなり多く存在しており，前方車両との相対距離にかかわらず主に相対速度の変化に応じて，加減速度を決定し追従する車両が存在すると考えられる．



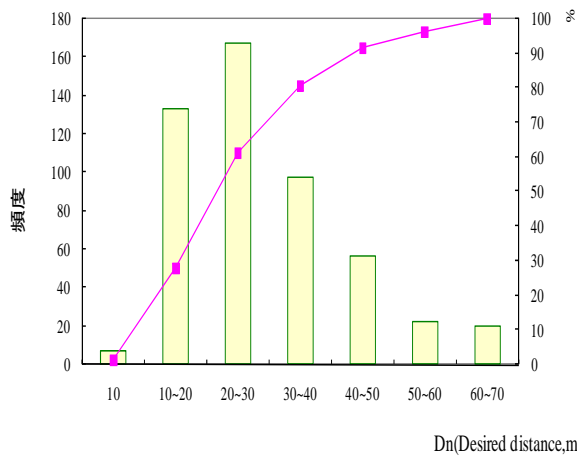
パラメータ C_1 の分布



パラメータ C_2 の分布



パラメータ C_3 の分布



希望距離(Dn)の分布

図 4.8 Helly モデルにおけるパラメータ C_1, C_2, C_3 の頻度及び累積分布

反応時間 T については、図 4.5 に示したとおり、Helly モデルを仮定すると、平均反応時間は約 0.8 秒であり、大多数の追従車両の反応時間が 0.6~1.4 秒に集中して分布することが分かった。520 台の追従車両ごとに反応時間の値が異なることが図 4.5 のように分布より明らかとなっているが、これは運転者によって前方車両に応じる時間が違うということを意味しており、反応時間に対する運転者間の異質性を示唆する。つまり、Helly モデルのパラメータと反応時間の頻度及び累積分布の結果は運転者間の異質性が存在していることを意味している。

4.5.2 時空間平均密度による追従挙動への影響

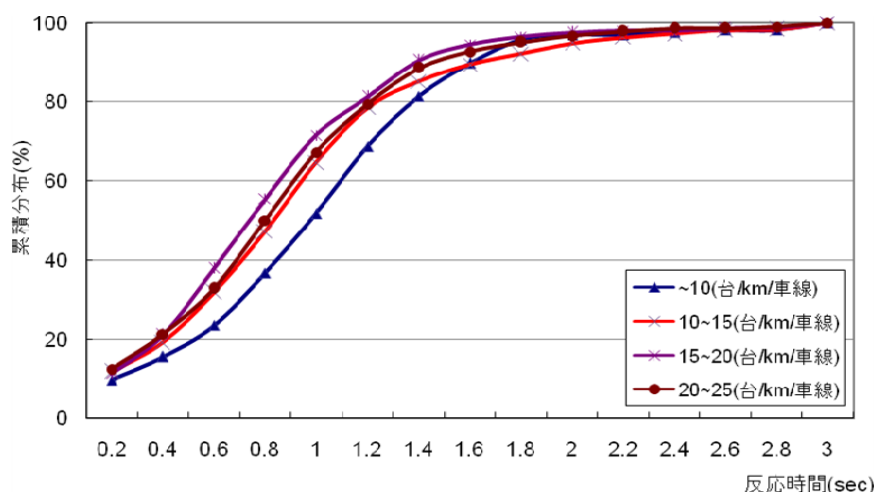
一般的に、追従挙動が交通環境及び道路構造・線形等の物理的要因によって変化する可能性は十分に考えることができる。本研究ではパラメータの変化に影響を及ぼす要因として、交通環境要因については交通流の時空間平均密度、物理的要因については走行車線の別と線形から分類した区間特性を各々選定し、追従データセット 2 の 2,283 台の追従車両を利用して推定したパラメータ C_1, C_2 と T (反応時間) の分布に基づき、各要因が追従挙動に及ぼす影響を分析した。ここで、追従データセット 1 を利用して運転者間異質性を分析した方法と同様に、Helly モデルのパラメータが負(-)となる追従車両を除いて全体 2,283 台の中で 2,087 台の追従車両（全体追従車両の 91.3%）のデータを利用してパラメータ推定を行い、分析・考察した。

本項の以下の説明では、交通環境要因として、時空間平均密度が追従行動に及ぼす影響について分析したケースに言及する。まず、時空間平均密度ごとに走行軌跡データを分類してパラメータを推定し、時空間平均密度の差が推定パラメータ C_1, C_2 そして T (反応時間) に及ぼす影響を分析した。時空間平均密度は、3 章に提示した車両データを利用して対象全区間である 600m 区間において車線別 30 秒単位でマクロ的に算定した交通量、速度を利用して計算した。分析の便宜のため、この時空間平均密度を 5 台/km/lane 単位で分けた。時空間平均密度別の追従車両データ数は表 4.4 に示すように、時空間平均密度が 25~30 台/km/lane に該当する追従車両は全体車両の 2% とデータ数が小さいことが判明したので、ここでは分析対象から除くこととした。残りの範囲のうち、最も密度の低い 10 台/km/lane 未満の追従車両を低密度状態での追従車両、最も密度の高い 20~25 台/km/lane を高密度状態での追従として、各時空間平均密度別に推定パラメータ C_1, C_2 と T の分布及び平均密度別 20%, 50% そして 80% 値を分析した。

表 4.4 時空間平均密度別分析データ数

時空間平均密度 (台/km/lane)	10 未満 (低密度)	10~15	15~20	20~25 (高密度)	25~30	全体
データ数(%)	202 (10%)	679 (33%)	722 (35%)	427 (20%)	57 (2%)	2,087 (100%)

反応時間(T)の時空間平均密度別分布を比べた結果，図 4.9 のように低密度 10 台/km/lane 未満の場合は，他の密度と比べて相対的に反応時間の値が大きい傾向があることが分かった．これは低密度での追従車両は，他のより密度が高い状況と比較して前方車両の挙動に対して緩慢な追従行動を見せる可能性ことを意味する．



パーセント比率	10(台/km/lane) 未満	10~15 (台/km/lane)	15~20 (台/km/lane)	20~25 (台/km/lane)
20%の反応時間	0.6sec	0.4 sec	0.4 sec	0.4 sec
50%の反応時間	1 sec	0.8 sec	0.8 sec	0.8 sec
80%の反応時間	1.4 sec	1.2 sec	1.2 sec	1.2 sec

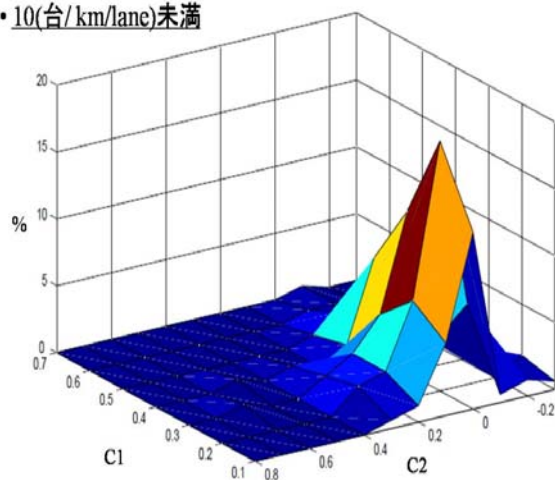
図 4.9 時空間平均密度による反応時間の累積分布

ここではパラメータ C_1, C_2 に注目して，各車両単位で推定した C_1, C_2 の値について，全追従車に対する各 C_1, C_2 が占める比率を表 4.5~4.8 に提示した．また，パラメータ C_1, C_2 の値の構成比率をより理解しやすくするため，パラメータ C_1, C_2 に対する比率を図 4.10 のように 3 次元のグラフで表現した．

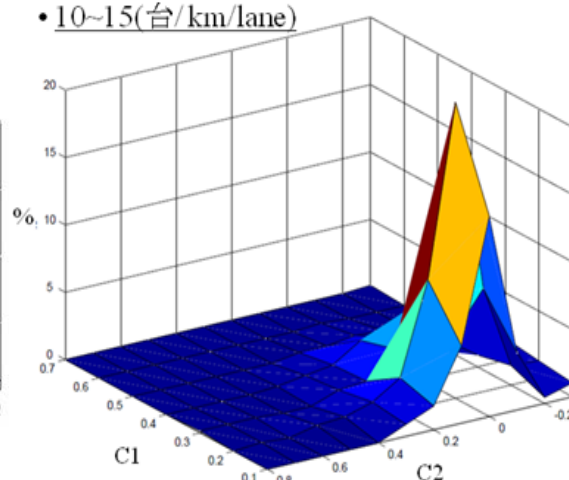
図 4.10 を見れば，低密度状態である 10 台/km/lane 未満では，2 つのパラメータ C_1, C_2 の存在範囲が相対的に広くなるのに比べて，それより高い密度状態

では、相対速度に対する影響を表すパラメータ C_1 の場合は $0.1 \sim 0.3$ に、相対距離と希望距離間の差異に対する影響を表すパラメータ C_2 の場合は $-0.1 \sim 0.1$ に集中して分布することがわかる。これは低密度状態で追従をする運転者については、先行車との相対速度と相対距離に対する反応に差異が相対的に大きくあるということを意味する。また、高密度状態 $20 \sim 25$ 台/km/lane の場合、相対速度に対する感度を表すパラメータ C_1 の分布範囲が他の密度に比べて小さくなる傾向がある。

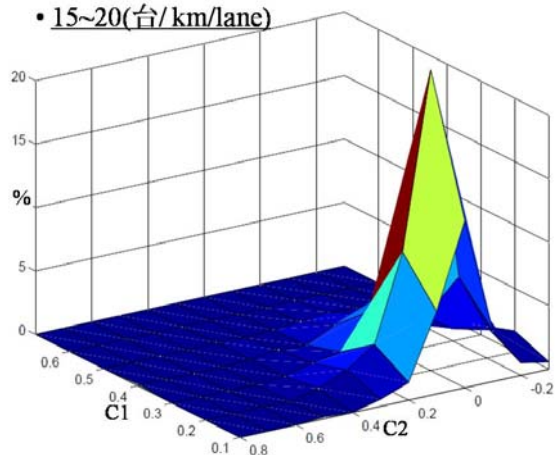
• 10(台/km/lane)未満



• 10~15(台/km/lane)



• 15~20(台/km/lane)



• 25~25(台/km/lane)

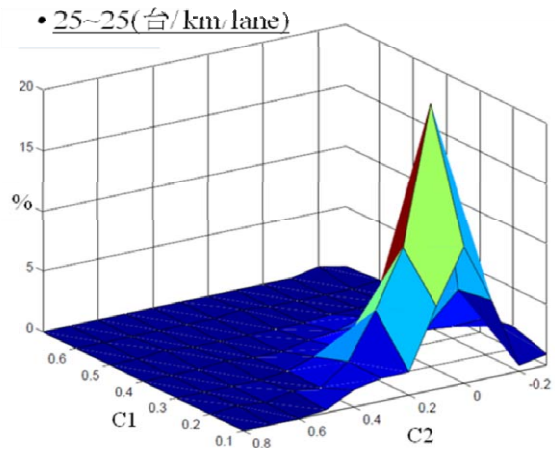


図 4.10 時空間平均密度別パラメータ C_1, C_2 の分布及び比較

表 4.5 時空間平均密度 10 台/km/lane 未満のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

10 台/km/lane 未満		パラメータ C_1							合計
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	
パラメータ C_2	~-0.2	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8%
	-0.2~-0.1	1.2	0.0	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0	3.0%
	-0.1~0	0.6	6.0	1.8	0.6	0.6	0.6	0.6	10.8%
	0~0.1	13.3	18.7	12.0	7.2	1.8	0.6	0.0	53.6%
	0.1~0.2	5.4	7.2	4.8	1.2	0.6	0.0	0.0	19.3%
	0.2~0.3	1.2	2.4	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0%
	0.3~0.4	0.6	1.8	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0	4.2%
	0.4~0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%
	0.5~0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6%
	0.6~0.7	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6%
合計		22.9%	37.3%	24.1%	10.8%	3.0%	1.2%	0.6%	100%

表 4.6 時空間平均密度 10~15 台/km/lane のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

10~15 台/km/lane		パラメータ C_1							合計
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	
パラメータ C_2	~-0.2	1.0	1.3	1.6	0.3	0.0	0.0	0.1	4.4 %
	-0.2~-0.1	0.4	1.5	0.9	0.9	0.0	0.0	0.0	3.7 %
	-0.1~0	4.3	7.7	2.4	0.6	0.4	0.0	0.0	15.3 %
	0~0.1	14.9	22.0	5.9	1.8	0.6	0.1	0.0	45.3 %
	0.1~0.2	5.7	9.3	2.8	2.1	0.3	0.0	0.0	20.2 %
	0.2~0.3	1.8	2.5	0.9	0.7	0.3	0.0	0.0	6.2 %
	0.3~0.4	0.9	1.2	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	3.2 %
	0.4~0.5	0.0	0.6	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.7 %
	0.5~0.6	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4 %
	0.6~0.7	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2 %
合計		29.0%	46.7%	15.5%	6.9%	1.6%	0.1%	0.1%	100%

表 4.7 時空間平均密度 15~20 台/km/lane のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

15~20 台/km/lane		パラメータ C_1							合計
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	
パラメータ C_2	~-0.2	0.6	1.7	0.4	0.4	0.1	0.0	0.0	3.2%
	-0.2~-0.1	1.0	2.5	1.0	0.4	0.3	0.1	0.0	5.3%
	-0.1~0	4.0	6.9	2.4	0.7	0.4	0.1	0.0	14.6%
	0~0.1	13.2	23.7	5.3	1.8	0.6	0.1	0.0	44.7%
	0.1~0.2	6.5	9.8	3.7	1.4	0.3	0.0	0.0	21.8%
	0.2~0.3	1.4	3.1	1.1	0.3	0.1	0.0	0.0	6.0%
	0.3~0.4	0.6	1.5	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	3.2%
	0.4~0.5	0.0	0.6	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	1.0%
	0.5~0.6	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2%
	0.6~0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1%
合計		27.3%	50.0%	14.7%	5.5%	1.9%	0.4%	0.0%	100%

表 4.8 時空間平均密度 20~25 台/km/lane のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

20~25 台/km/lane		パラメータ C_1							合計
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	
パ ラ メ ー タ C_2	~-0.2	0.9	1.9	0.9	0.5	0.0	0.2	0.0	4.4%
	-0.2~-0.1	0.5	3.0	0.9	0.5	0.2	0.0	0.0	5.2%
	-0.1~0	6.3	5.9	1.2	0.5	0.2	0.0	0.0	14.1%
	0~0.1	11.2	21.8	4.0	1.4	0.2	0.0	0.0	38.6%
	0.1~0.2	6.8	10.3	2.6	0.7	0.0	0.0	0.0	20.4%
	0.2~0.3	1.9	5.6	1.2	0.5	0.0	0.2	0.0	9.4%
	0.3~0.4	1.9	1.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7%
	0.4~0.5	1.4	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9%
	0.5~0.6	0.2	0.5	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.9%
	0.6~0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2%
合計		31.1%	51.3%	11.9%	4.2%	0.9%	0.5%	0.0%	100%

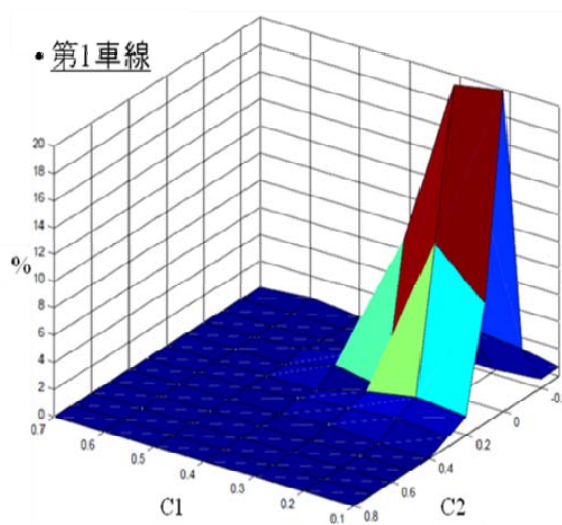
4.5.3 走行車線の差異による追従挙動への影響

走行車両が追従行動に及ぼす影響を分析するため、本研究では走行車両を第3章に提示したとように第1~5車線に分けて、車線別推定パラメータ C_1, C_2 と反応時間(T)の分布を求めた。各走行車線の分析データ数は、表4.9に示すとおりとなる。

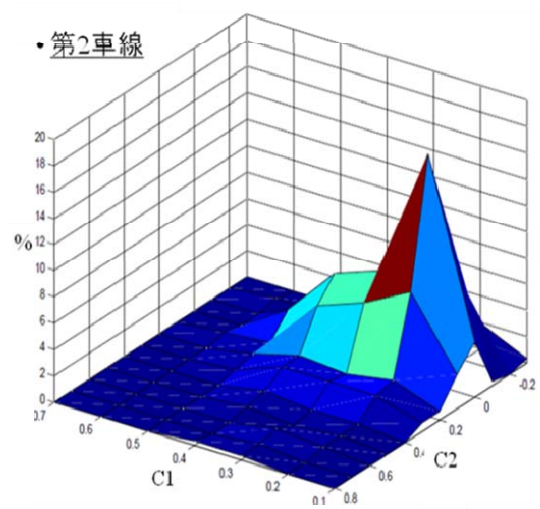
ここでは、走行車線別の推定パラメータ C_1, C_2 の差異に着目して分析するため、車線別の全追従車両に占める推定パラメータ C_1, C_2 の値の構成比率を、表4.10~4.14に示した。また、走行車線別にパラメータの比率を比較しやすくするため、パラメータ C_1, C_2 の構成比率を図4.11のように3次元のグラフで表現した。図4.11から、相対距離に対する感度を表すパラメータ C_2 については走行車線別の差異はあまり顕著ではないことが分かったが、相対速度に対する感度を表すパラメータ C_1 の場合は、車線間で分布形状に大きな差異があるといえる。特に守口線・環状線からの流入車線が合流する第2,3車線について、他の車線と比較して、推定パラメータ C_1 の存在範囲が0.1~0.6と広く分布しており、他の車線と比して C_1 が大きくなる車両が相対的に多く含まれることがわかった。これより、第2,3車線を走行する追従車両は‘合流行動及び他の合流車両の影響’によって特に相対速度の変化に対して敏感に反応する車両が多いと判断できる。

表 4.9 走行車両別分析データ数

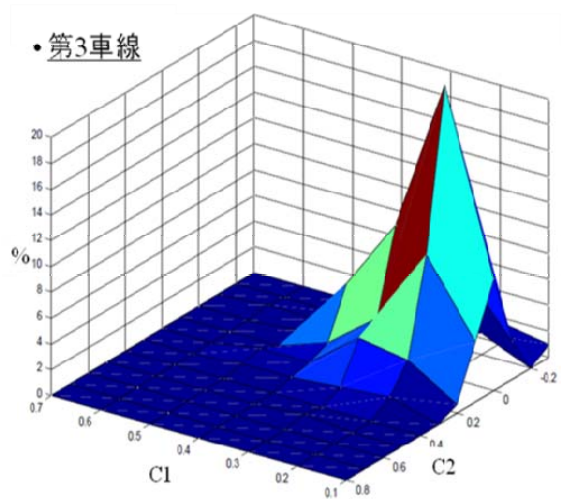
走行車線別	第1車線	第2車線	第3車線	第4車線	第5車線	全体
データ数(%)	295 (14%)	311 (15%)	301 (15%)	529 (25%)	651 (31%)	2,087 (100%)



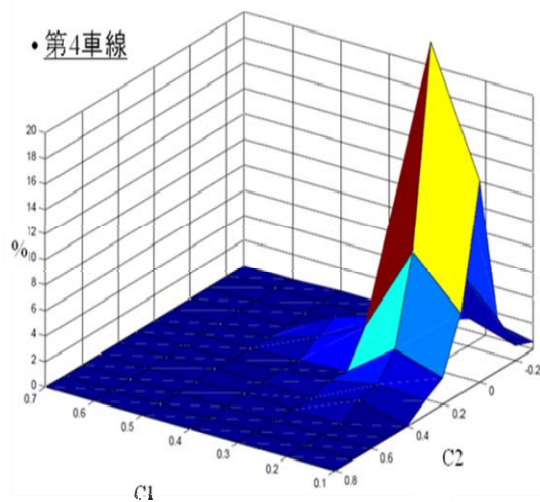
第 1 車線のパラメータ C_1, C_2 の分布



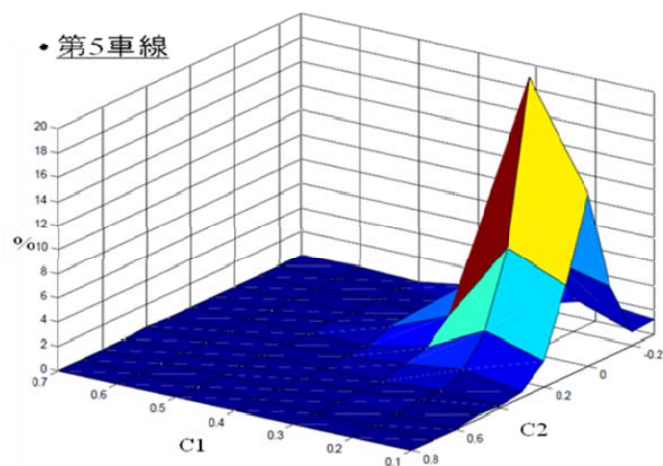
第 2 車線のパラメータ C_1, C_2 の分布



第 3 車線のパラメータ C_1, C_2 の分布



第 4 車線のパラメータ C_1, C_2 の分布



第 5 車線のパラメータ C_1, C_2 の分布

図 4.11 走行車線別パラメータ C_1, C_2 の分布及び比較

表 4.10 走行車線の第 1 車線のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

第 1 車線		パラメータ C_1							
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	合計
パラメータ C_2	~-0.2	0.7	1.4	0.7	0.0	0.0	0.3	0.0	3.1 %
	-0.2~-0.1	0.7	0.3	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	2.4 %
	-0.1~0	3.7	4.1	1.7	0.3	0.0	0.0	0.0	9.8 %
	0~0.1	23.7	19.7	10.5	1.0	0.3	0.0	0.0	55.3 %
	0.1~0.2	8.8	12.2	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	22.4 %
	0.2~0.3	1.4	1.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1 %
	0.3~0.4	0.7	1.0	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	2.7 %
	0.4~0.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3 %
	0.5~0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 %
	0.6~0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 %
合計		39.7 %	40.3 %	16.3 %	3.1 %	0.3 %	0.3 %	0.0%	100%

表 4.11 走行車線の第 2 車線のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

第 2 車線		パラメータ C_1							
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	合計
パラメータ C_2	~-0.2	0.3	1.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	3.2%
	-0.2~-0.1	0.0	1.9	1.0	1.6	0.0	0.3	0.0	4.8%
	-0.1~0	0.3	9.0	3.5	2.6	1.6	0.0	0.0	17.1%
	0~0.1	4.2	17.4	7.4	6.1	2.3	0.0	0.0	37.4%
	0.1~0.2	2.6	7.7	5.8	4.5	0.6	0.3	0.0	21.6%
	0.2~0.3	0.6	1.9	1.3	1.6	0.6	0.0	0.0	6.1%
	0.3~0.4	0.6	1.6	1.6	1.6	0.3	0.0	0.0	5.8%
	0.4~0.5	0.0	0.3	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	1.3%
	0.5~0.6	0.0	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.9%
	0.6~0.7	0.0	0.3	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	1.3%
合計		8.7 %	42.6 %	22.9 %	19.7 %	5.5 %	0.6 %	0.0%	100%

表 4.12 走行車線の第 3 車線のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

第 3 車線		パラメータ C_1							
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	合計
パラメータ C_2	~-0.2	1.0	1.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3%
	-0.2~-0.1	0.0	1.7	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	3.0%
	-0.1~0	3.0	7.3	3.0	0.7	0.3	0.3	0.0	14.6%
	0~0.1	8.6	22.6	10.6	5.0	0.3	0.0	0.0	47.2%
	0.1~0.2	4.7	10.3	4.3	1.3	0.0	0.0	0.0	20.6%
	0.2~0.3	0.7	3.0	3.7	0.7	0.7	0.0	0.0	8.6%
	0.3~0.4	0.0	1.0	0.7	0.3	0.3	0.0	0.0	2.3%
	0.4~0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%
	0.5~0.6	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3%
	0.6~0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%
合計		17.9%	47.5%	23.9%	8.6%	1.7%	0.3%	0.6%	100%

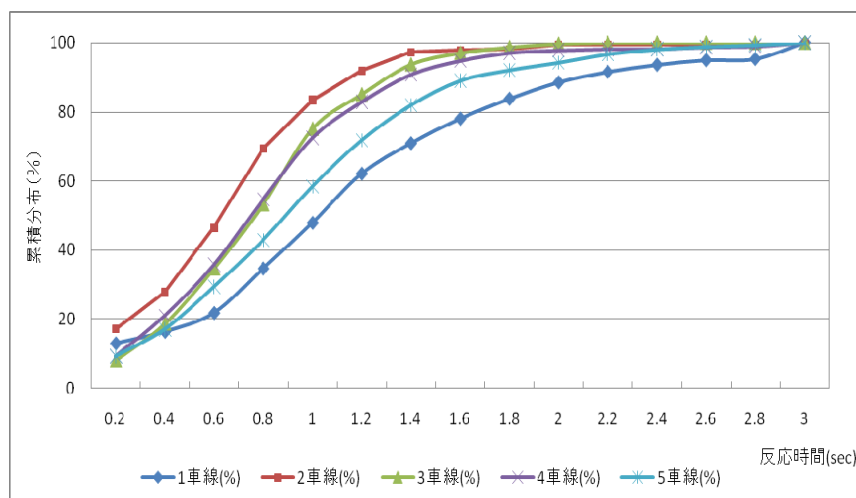
表 4.13 走行車線の第 4 車線のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

第 4 車線		パラメータ C_1							
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	合計
パ ラ メ ー タ C_2	~-0.2	0.6	1.3	0.8	0.2	0.2	0.0	0.0	3.0%
	-0.2~-0.1	1.1	2.3	0.9	0.4	0.2	0.2	0.0	5.1%
	-0.1~0	4.2	7.8	1.5	0.4	0.2	0.0	0.6	14.0%
	0~0.1	15.9	25.7	3.0	1.9	0.0	0.2	0.0	46.7%
	0.1~0.2	6.2	10.0	3.0	1.1	0.0	0.0	0.0	20.4%
	0.2~0.3	2.1	3.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	5.9%
	0.3~0.4	1.1	1.3	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	3.4%
	0.4~0.5	0.0	0.9	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	1.3%
	0.5~0.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2%
	0.6~0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%
合計		22.9%	31.2%	52.6%	10.2%	4.9%	0.8%	0.4%	100%

表 4.14 走行車線の第 5 車線のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

第 5 車線		パラメータ C_1							
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	合計
パ ラ メ ー タ C_2	~-0.2	1.2	1.7	1.1	0.8	0.0	0.2	0.0	4.9%
	-0.2~-0.1	1.1	2.8	1.1	0.3	0.3	0.0	0.0	5.5%
	-0.1~0	5.7	6.9	2.0	0.2	0.3	0.0	0.0	15.1%
	0~0.1	14.3	22.8	4.8	0.6	0.0	0.0	0.0	42.5%
	0.1~0.2	7.5	9.5	2.8	0.8	0.2	0.0	0.0	20.7%
	0.2~0.3	2.2	3.5	1.1	0.2	0.0	0.2	0.0	7.1%
	0.3~0.4	0.5	1.2	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	2.5%
	0.4~0.5	0.1	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5%
	0.5~0.6	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8%
	0.6~0.7	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3%
合計		32.8%	49.5%	13.4%	3.0%	0.9%	0.3%	0.0%	100%

また、反応時間に注目すると、図 4.12 のように第 2 車線の場合に反応時間が一番短くて、第 1 車線の場合に最大の値を持つ傾向があることが分かった。したがって、第 2 車線を走行する車両は敏感な追従形態が現われる一方で、第 1 車線を走行する追従車両は他の車線で走行する追従車両と違って、相対的に緩慢な追従行動が現われることが分かる。



パッセント比率	第 1 車線	第 2 車線	第 3 車線	第 4 車線	第 5 車線
20%の反応時間	0.6sec	0.4 sec	0.6 sec	0.4 sec	0.6 sec
50%の反応時間	1.2 sec	0.8 sec	0.8 sec	0.8 sec	1.0 sec
80%の反応時間	1.8 sec	1.0 sec	1.2 sec	1.2 sec	1.4 sec

図 4.12 走行車線による反応時間の累積分布

4.5.4 区間特性の差異による影響

道路線形及び物理的構造の差が，追従挙動に及ぼす影響をモデルの Helly モデルの推定パラメータから分析するため，本対象区間を直線，カーブそして合流区間に分け，区間毎にパラメータ推定を行った．パラメータ C_1, C_2 と反応時間 (T) の分布を 4.5.2 ならびに 4.5.3 同様に 3 次元グラフとして表したものを，図 4.13(表 4.16~4.18)に示す．なお，本項の分析で利用した区間別追従車データ数は表 4.15 の通りである．

表 4.15 区間別の分析対象追従車データ数

区間別	直線区間	カーブ区間	合流区間	全体
データ数(%)	479 (23%)	507 (24%)	1,101 (53%)	2,087 (100%)

まず，区間別パラメータ C_1, C_2 に注目した場合は，直線区間の場合はパラメータ C_1, C_2 の分布範囲がパラメータそれぞれ C_1 : 0.1 ~ 0.3, C_2 : -0.1 ~ 0.2 と一番小さくなったのに対して，合流区間の場合はパラメータの範囲がそれぞれ， C_1 : 0.1 ~ 0.5, C_2 : -0.2 ~ 0.4 と全般的に広く分布し，相対速度に対する反応を表す C_1 については，パラメータ値が増加する傾向を持っていることがわかる．また，カーブ及び合流区間では，パラメータ C_2 の符号が負(-)となる

比率が直線区間に比べて高くなる傾向が現われており，区間特性が追従に影響を及ぼすことが確認できた．これはカーブ区間と合流区間で追従車両が前方車両を追従する時，前方車両との相対距離だけではなく，区間特性によって影響を受けて安全のために，減速する傾向があるということを示唆している．

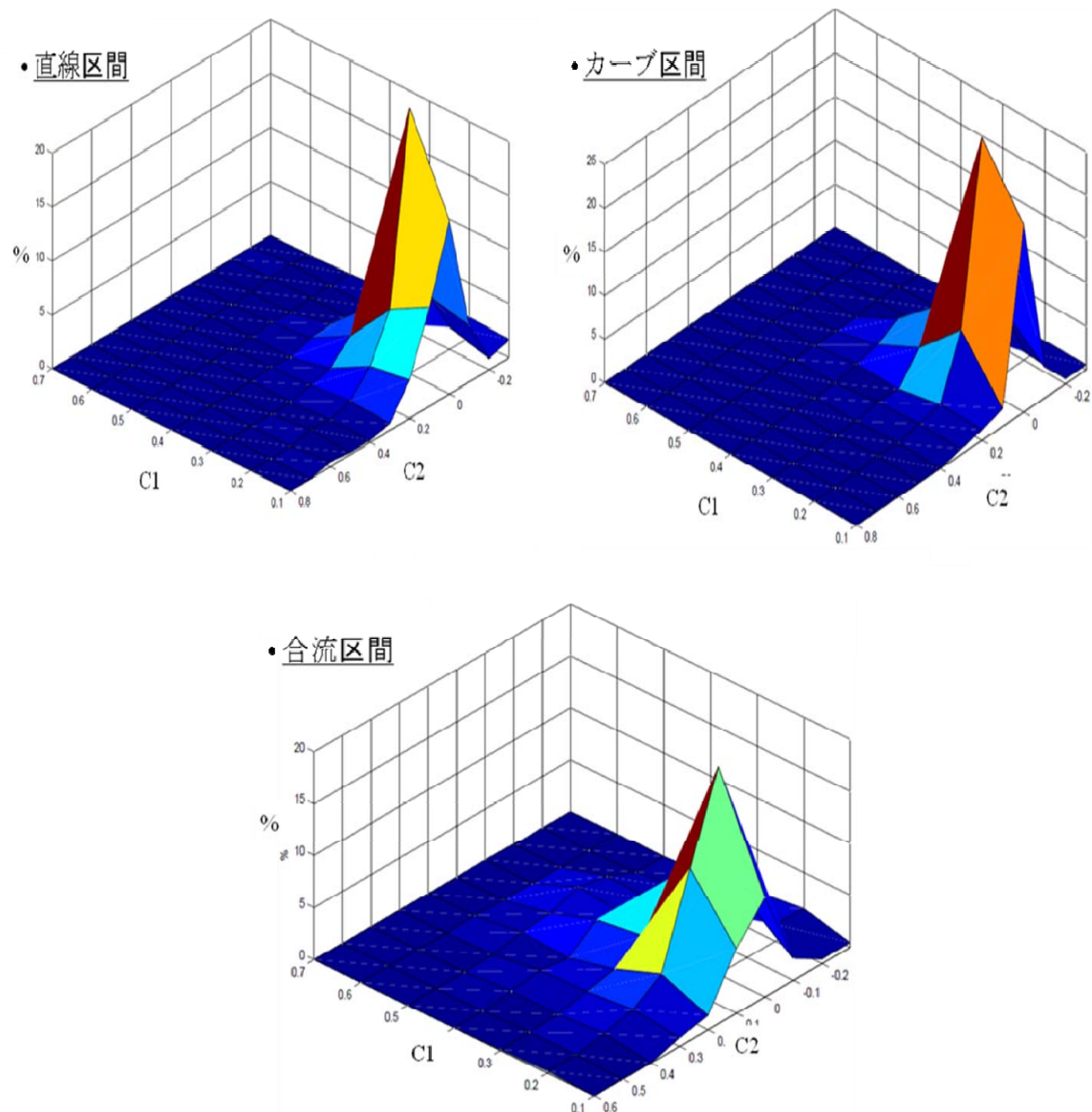


図 4.13 区間特性格パラメータ C_1, C_2 の分布及び比較

表 4.16 直線区間のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

直線区間		パラメータ C_1							合計
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	
パラメータ C_2	~-0.2	1.3	1.3	0.4	0.4	0.2	0.0	0.0	3.6 %
	-0.2~-0.1	0.6	1.7	0.8	0.2	0.2	0.4	0.0	4.0 %
	-0.1~0	4.6	5.4	1.7	0.2	0.2	0.2	0.0	12.3 %
	0~0.1	17.2	25.7	4.6	0.8	0.0	0.0	0.0	48.3 %
	0.1~0.2	9.6	7.5	2.9	0.6	0.2	0.0	0.0	20.9 %
	0.2~0.3	3.6	2.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3 %
	0.3~0.4	0.6	0.8	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	2.1 %
	0.4~0.5	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4 %
	0.5~0.6	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6 %
	0.6~0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4 %
合計		38.3%	46.0 %	11.7 %	2.5 %	0.8 %	0.6 %	0.0 %	100%

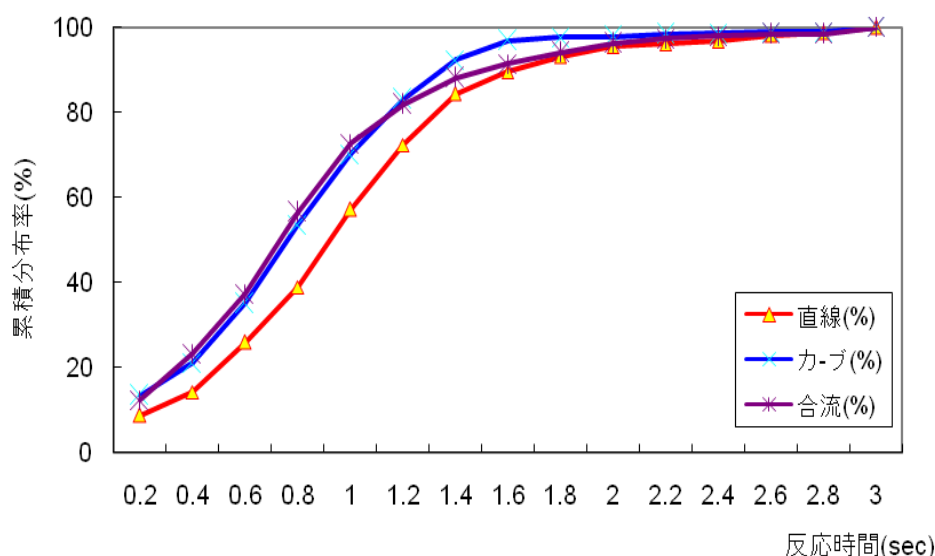
表 4.17 カーブ区間のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

カーブ区間		パラメータ C_1							合計
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	
パラメータ C_2	~-0.2	1.2	2.0	1.4	0.6	0.0	0.0	0.0	5.1%
	-0.2~-0.1	1.4	3.0	0.8	0.6	0.2	0.0	0.0	5.9%
	-0.1~0	6.9	10.7	2.2	0.2	0.4	0.0	0.0	20.3%
	0~0.1	16.8	24.5	5.7	2.4	0.0	0.0	0.0	49.3%
	0.1~0.2	2.0	6.1	3.6	1.2	0.0	0.0	0.0	12.8%
	0.2~0.3	1.2	1.4	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	3.6%
	0.3~0.4	0.6	0.8	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0%
	0.4~0.5	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4%
	0.5~0.6	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.6%
	0.6~0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%
合計		30.0%	48.9%	14.6%	5.7%	0.8%	0.0%	0.0%	100%

表 4.18 合流区間のパラメータ $C_1 - C_2$ の分布比率

合流区間		パラメータ C_1							合計
		0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	
パラメータ C_2	~-0.2	0.5	1.5	1.0	0.4	0.0	0.2	0.0	3.5%
	-0.2~-0.1	0.5	1.6	1.1	0.7	0.1	0.0	0.1	4.1%
	-0.1~0	2.1	5.4	2.5	1.1	1.3	0.0	0.0	12.4%
	0~0.1	9.5	20.0	7.1	4.3	1.8	0.0	0.1	42.8%
	0.1~0.2	6.2	11.7	3.1	2.5	0.9	0.0	0.0	24.3%
	0.2~0.3	1.4	3.2	1.5	0.4	0.6	0.1	0.0	7.1%
	0.3~0.4	0.8	1.4	0.9	0.7	0.1	0.0	0.0	3.9%
	0.4~0.5	0.0	0.6	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	1.3%
	0.5~0.6	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4%
	0.6~0.7	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3%
合計		20.9%	45.9%	17.6%	10.4%	4.8%	0.3%	0.2%	100%

また，反応時間(T)を区間別で比べた結果，カーブ及び合流区間の場合は反応時間が短くなる傾向にあるのに対し，直線区間では長い反応時間を持つ車両が相対的に増加する傾向が現われている．ここからカーブ及び合流区間では，直線区間に比べて先行車の相対速度と相対距離により表される挙動およびその変化に敏感に飯能市，追従行動をするケースがたくさん出現しているものと判断することができる．



パッセント比率	直線区間	カーブ区間	合流区間
20%の反応時間	0.6sec	0.4sec	0.4sec
50%の反応時間	1.0sec	0.8sec	0.8sec
80%の反応時間	1.4sec	1.2sec	1.2sec

図 4.13 区間特性による反応時間の累積分布

4.6 結論

本章ではビデオ画像から連続車両軌跡データを抽出し，都市高速道路の合流部を含む全区間の追従挙動に焦点を合わせて，追従行動を分析した．この時，GM モデルと Helly モデルを利用し，一つの追従車両別に決定係数，パラメータとして反応時間を推定した．また，推定結果から運転者間の異質性について分析して，交通状況，車線，道路構造が追従挙動に及ぼす影響についても基礎分析を行った．この分析結果から得られた知見を整理すると下のようになる．

- 1) GM モデルと Helly モデルを利用して追従挙動を分析した結果，Helly

モデルが **GM** モデルより決定係数ももっと高く、また反応時間もより現実的な値を持つことを分かった。したがって、**Helly** モデルの方が本対象区間の追従挙動をよく表現することと考えられる。しかし、パラメータ推定する時に、全モデルのうちで決定係数が 0.5 以上になる追従車両モデルのみを分析に利用した。よって、**Helly** モデルで本対象区間の追従挙動に対してよく説明できるが、表現できない追従挙動もあることを考えられる。これは、**Helly** モデルで説明できない追従挙動も含む全車両に対する追従挙動の分析とこれをよく説明できるモデル化必要を提示する。

- 2) 推定結果によって、運転者間の異質性が存在していることをわかった。しかし、推定結果より、運転者間の追従挙動には異質性が存在する可能性があり、実際の交通流を個々の車両に着目して分析・モデル化する場合に、現象を運転者間の異質性を考慮することが必要と考えられる。
- 3) 追従挙動に影響を及ぼす要因に対して分析した結果、追従挙動は交通環境及び道路構造・線形等の物理的要因によって十分に変化できることをわかった。これは追従挙動を分析する時、追従車両が走行する区間の特性（交通環境及び道路構造・線形等）を考慮して、運転者の追従挙動を説明する必要を見せる。

参考文献

- [1] 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則. 高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, Vol.44, No.12, pp.27-34, 2001.
- [2] 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則, 大谷武彦. 高速道路単路部渋滞発生時の交通現象解析, 土木計画学研究・講演集, No.21(2), pp.905-908, 1998.
- [3] 巻上, 豊田, 松尾. 阪神高速道路における折り込み区間の交通実態と交通流解析, 土木学会論文集, No.440/IV-16, pp41-50, 1992.
- [4] 大口敬. 高速道路単路部渋滞発生解析－追従挙動モデルの整理と今後の展望－, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp39-51, 2000.
- [5] 阿部幸康, 高森衛. 追従方程式から得られる交通流モデルの一般解に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.42IV, pp.60-61, 1987.
- [6] 大庭孝之, 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和. 渋滞流における追従挙動モデルの検証, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.43IV, pp.252-253, 1988.
- [7] 尾崎晴男. 自動車の追従走行挙動に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.375-380, 1991.
- [8] 山田稔, 鈴木徹. 街路の追従走行における速度と車間距離の変動に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.10, pp.87-94, 1992.
- [9] 洪多禧, 宇野伸宏, 倉内文孝. “画像データを用いた車両追従挙動への影響要因に関する基礎的分析”, 第 28 回交通工学研発表会論文報告集, 2008.
- [10] Bando, M., et al, “Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation”, *Physical Review E* 51, 1995, pp.1035-1042.

- [11] Bekey, G. A, Burnham, G. O., & Seo, J. Control theoretic models of human drivers in car following. *Human Factors*, 19 (4), 399-413, 1977.
- [12] Brackstone, M., & McDonald, M. The microscopic modeling of traffic flow: weaknesses and potential developments. In D. E. Wolf, M. Schreckenberg, & A. Bachem, *Workshop on Traffic and Granular Flow*, pp. 151-166, 1996. Singapore: World Scientific.
- [13] Brackstone, M., & McDonald, M. Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F* 2, pp.181-196, 1999.
- [14] Chandler, R. E., Herman, R., & Montroll, E. W. Traffic dynamics: studies in car following. *Operations Research*, Vol.6, pp.165-184, 1958.
- [15] Evans, L., & Rothery, R. Experimental measurement of perceptual thresholds in car following. *Highway Research Record*, 64, pp.13-29, 1973.
- [16] Evans, L., & Rothery, R. Perceptual thresholds in car following \pm a recent comparison. *Transportation Science*, 11 (1), pp.60-72, 1977.
- [17] Herman, R., & Potts, R.B. Single Lane Traffic Theory and Experiment. In *Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow*, Research Labs, General Motors, pp. 147-157, 1959. New York: Elsevier.
- [18] Heyes, M. P., & Ashworth, R. Further research on car following models. *Transportation Research*, 6, pp.287-291, 1972.
- [19] Gazis, D. C., Herman, R., & Potts, R. B. Car following theory of steady state traffic flow. *Operations Research*, Vol. 7, pp. 499-505, 1959.
- [20] Hanken, A., & Rockwell, T.H. A model of car following derived empiriacally by piece-wise regression analysis. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, pp. 40-41, 1967. New York: Elsevier.

- [21] Helly, W. Simulation of Bottlenecks in Single Lane Traffic Flow. In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow., Research Laboratories, General Motors ,pp. 207-238, 1959. New York: Elsevier .
- [22] Kikuchi, C., & Chakroborty, P. Car following model based on a fuzzy inference system. Transportation Research Record, 1365, pp. 82-91, 1992.
- [23] Kometani, E., & Sasaki, T. On the stability of traffic flow. Journal of Operations Research Japan, 2, pp. 11-26, 1958.
- [24] Hong, D.H., Uno, N. and Kurauchi, F. “Empirical analysis of driver’s Car following heterogeneity based on video image data”, *The Twelfth International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, pp.401-410, 2007.
- [25] Michaels, R.M. Perceptual factors in car following. In Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, pp. 44-59. Paris: OECD, 1963.
- [26] Xing, J. A parameter identification of a car following model. In Proceedings of the Second World Congress on ATT. Yokohama, November, pp. 1739-1745, 1995.

第 5 章 多重追従挙動モデルの推定とドライバー挙動の異質性に関する分析

5.1 概要

4 章でも述べたとおり、交通事故や渋滞の発生が、人命・財産の損失、社会的費用の増加を引き起こしていることは、世界共通の緊要な社会的課題といえる。事故や渋滞の発生メカニズムに着目すると、道路環境からも影響をうけつつ、基本的に車両間の相互作用の結果として、車両間のコンフリクトが生じ、さらに事故や渋滞につながると可能性が高いと考えられる。特に、合流区間での運転者は一般区間に比べてより大きな運転負荷がかかるため、コンフリットや交通事故が起こりやすい。また、合流区間での運転者は自車両の位置だけではなく、他の車両の位置を認知しなければならない。すなわち、他の車両との縦(進行方向)と横(車線横断方向)の距離を皆認知して、安全のために適切な行動を決める必要があり、その結果運転者にも負荷が大きくなる傾向にある。したがって、合流区間での車両挙動を分析・モデル化するとともに、交通流としての安全性・効率性を評価するための方法を開発することが重要である。

合流区間内で着目すべき車両挙動は、車線横断方向に関わる挙動(e.g., merging, giving way and cutting in across the stream of traffic)と主に車両進行方向に特化した挙動(e.g. car following behavior along the stream of traffic)であり、これらの挙動を明示的に考慮して交通流動を分析するための手法も必要となる。一般的に、ミクロレベルで交通の流れを表現することができるミクロ交通シミュレーションモデルは、様々な交通管理や規制などに反応して車両挙動そして交通流がどのように変化するかを分析するために適用されてきた。しかし、ミクロレベルでの車両挙動の詳しい測定は技術的に制約があるから、大部分のミクロシミュレーションは、これまで十分な車両挙動モデルの開発ならびに開発されたモデルの検証ができていたとは言い難かった。

本研究では、都市高速道路の合流部を含む全区間のビデオ画像データから抽出した車両の軌跡データを利用して、ミクロな車両の動きのモデル化を試みた。都市高速道路では、高密な交通流が実現されることが多く、このような場合、交通流の中で追従走行をするドライバーは、自車の直前の車両のみ

ならず，前を走行する複数台の車両の挙動に注意を払うことにより，自車の安全な走行を確保している可能性が高いといえる．このような議論を踏まえて，本章では第 4 章で分析した追従行動(単独追従挙動)を基本として，Helly model では十分表現することができない追従挙動を解析し，モデル化するため，多重追従行動に焦点を当てて分析した．抽出したビデオ画像データから，本対象区間の追従車両に対して多重追従行動を分析し，この行動内に運転者間の異質性について調査した．また，本対象区間を直線，カーブ，そして合流区間に分類して道路の幾何構造の特性による多重追従行動の差に注目した．

5.2 多重車両追従モデル(Multi-anticipative car following model)

車両の追従モデルに関する研究はおおよそ半世紀以上歴史を持ち，その間，追従車両の運転者が交通流の中で，自車の前を走行する車両の挙動に対して，どのように自車の速度を調節する過程を説明することを主旨として研究・開発されてきたモデルである(Pipe, 1953)．現在まで研究されてきた車両追従モデルに関する研究は，大きく Single car following model(単独車両追従モデル)と Multi-anticipative car following model(多重車両追従モデル)に分類することができる．単独車両追従モデルは，図 5.1 のように，追従車両が安全な走行をするために，自車両を基準として最も近い一番目前方車両のみを考慮して追従行動を説明するモデルであるのに比べて，多重車両追従モデルでの追従運転者は，直前の前方車両だけではなく，複数の前方車両の行動に応じて追従行動を決定する．したがって，多重車両追従モデルは単独車両追従モデルから拡張された概念を持った車両追従モデルといえる．

多重車両追従モデルは，特に高密度な交通状態を想定して，さらに現実的に自車の前を走行する複数の車両が追従行動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，研究開発がなされてきた(Hoogendoorn et al., 2006)．よって，本研究ではもっと現実的に追従行動を説明できる多重車両追従モデルを考慮して対象区間の追従車両と多重の前方車両間との関係を把握して，追従行動を分析することを目的とする．また，道路条件が多重追従挙動に及ぼす影響に対しても論議する．多重車両追従モデルとして本研究では，最も代表的なモデルである Lenz model と Generalized Helly model (Bexelius model 含む)の両方を考慮した．

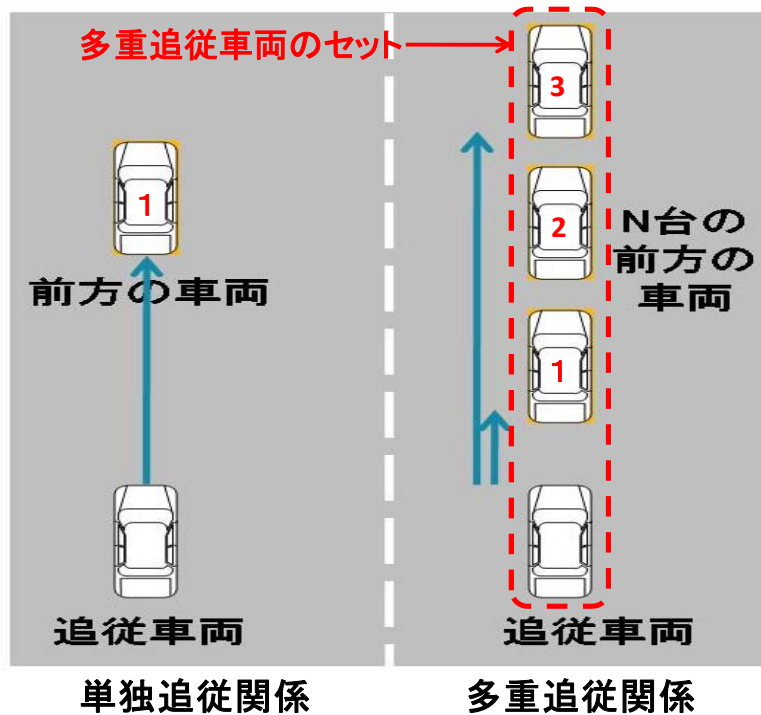


図 5.1 単独車両追従関係と多重車両追従関係の比較

5.2.1 Lenz モデル(Lenz model)

Lenz et al.(1999)のモデルは，単独車両追従モデルでの最適速度の概念を利用して追従関係を説明する Bando model(Bando 1995，第 2 章を参照)を基本として，追従車両の運転者が一般化された多重の前方車両の行動に反応して追従する多重車両追従モデルといえる．このモデルでは基本的に‘追従車両の運転者は自分の速度($v(t)$)と持つことができる最適速度($V(t)$)間の差を基本とし，加速あるいは減速の行動を決定する’という概念に基づいている．よって，追従車両の加速また減速は次の式 5.1 のように表現される．

$$a(t) = \sum_{j=1}^m K_j \left\{ V \left(\frac{S_j(t)}{j} \right) - v(t) \right\} \quad \text{式 5.1}$$

ここで，最適速度 $V(t)$ は，前方車両との相対距離に関して追従車両の速度を説明する関数で表現される．パラメータ K_n は，追従車両の速度が最適速度とは異なる時，各車両の速度が最適速度にどれだけ早く収束するかを表現した j 番目の前方車両に対する敏感さの程度を表す係数である．この時，パラメータ K_n は常に正の値を持つ．

5.2.2 Generalized Helly Model

Generalized Helly model は、Helly(1959)によって提示された Linear model (Helly, 1959, 第 2,4 章を参照)から拡張されたモデルである。オリジナルの Helly model は単独車両追従モデルであり、追従車両は直前の前方車両のみに反応して追従すると仮定されているが、多重車両追従モデルである Generalized Helly model では、追従車両は直前の前方車両だけではなく複数の前方車両に反応して追従するという想定に基づきモデル化を試みたものである。先述の通り、とりわけ、都市高速道路等の交通流に代表される高密度交通流の中で追従する車両に着目した場合、安全な走行を維持する上で、直前の車両のみに注視したのでは不十分な状況も往々にして出現する。このような状況下では、Generalized Helly model を適用することは妥当と考えられる。このモデルは、相対速度と相対距離(相対距離と希望距離との差(相対距離 - 希望距離))を利用して、複数台の前方車両と相対関係に基づき追従行動を線形関係式により簡単に説明するものである。

Generalized Helly model と同じ構造で、多重前方車両に対する追従行動を多重前方車両との相対速度のみを利用して簡単に表現したモデルとして、Bexelius model がある。Generalized Helly model はこの Bexelius model の構造式を含むので、本研究では Generalized Helly model のみを説明する。Generalized Helly model は、単独車両追従モデルである Helly model (式 4.2) から派生し、式 5.2 のように表わされる。

$$\text{Helly model: } a_i(t+T) = a [\Delta v_i(t)] + \beta [\Delta x_i(t) - S_i] \quad \text{式 4.2 (再掲)}$$

$$\text{Generalized Helly model: } a_i(t+T) = \sum_{j=1}^{m_{1,i}} \alpha_i^{(j)} \Delta v_i^{(j)}(t) + \sum_{j=1}^{m_{2,i}} \beta_i^{(j)} (\Delta x_i^{(j)}(t) - S_i^{(j)}) \quad \text{式 5.2}$$

ここで、変数およびパラメータは以下の通りである。

- a_i : 追従車両の加速度(m/sec²)
- $\alpha_i^{(j)}$: 前方車両 j(for j=1, …, m)に対する相対速度に関する追従車両 i の敏感度を表すパラメータ
- $\beta_i^{(j)}$: 前方車両 j(for j=1, …, m)と追従車両 i の相対距離と希望距離(desired distance)との差に対する追従車両の敏感度を表すパラメータ
- $\Delta v_i^{(j)}$: 前方車両 j と追従車両 i との相対速度(m/sec)
- $\Delta x_i^{(j)}$: 前方車両 j と追従車両 i との相対距離(m)
- $S_i^{(j)}$: 前方車両 j に対する追従車両 i による要求される希望距離(m)
- T : 反応時間(sec)

Generalized Helly model の構造式で推定するパラメータの数を最少にするし、それらの線形関係を保つために、本研究では Ossen and Hoogendoorn (2006, 2007) が提示した Desired distance (希望距離) の関係式 (式 5.3) を適用する。これは、j 番目の前方車両に対する希望距離を測定するための構成式である。

$$S_i^{(j)} = s_{0,i} + j\tau_i v_i \quad \text{式 5.3}$$

ここで、

$S_i^{(j)}$: 前方車両 j に対する追従車両 i による要求される希望距離(m)

$s_{0,i}$: 追従車両 i による停止距離(m)

τ_i : 前方車両 j と追従車両 i との最小 time-headway(sec)

v_i : 追従車両 i の速度(m/sec)

である。

Generalized Helly model では、また、推定対象ではない外的に設定すべきパラメータ m_{1j} , m_{2j} , つまり多重追従行動を分析するため考慮される前方車両の台数を表すパラメータが用いられる。これらは線形関係で、考慮される多重の前方車両による追従車両の加速、減速を表現するために考慮される。

5.2.3 多重車両追従モデルの比較と選定

多重車両追従モデルに関する研究の中で、Hoogendoorn(2006,2007)は多重追従を仮定して追従モデルを構築することで、従来型の単独車両追従モデルでは十分に説明力が得られない様な追従状況も説明できる可能性が高まった点を提示している。この研究の結果に基づいて本研究では、分析対象区間として設定した都市高速道路の合流部を含む区間の追従車両の挙動も、多重車両追従モデルによりよく説明することができるという点を証明するとともに、道路の幾何構造によって多重前方車両に対する運転者の追従行動に差異が生じる可能性がある点に焦点を当てた。つまり、追従車両の行動は、道路の幾何構造が異なれば多重前方車両の行動に対する反応も異なることで仮定して、多重追従行動における運転者の行動の異質性の存在に注目した。

上記の議論を踏まえて、本研究では多重車両追従モデルとして Generalized Helly model を適用した。Lenz model を利用して多重の前方車両に対する追従行動を分析する場合は、どのような区間でも最適速度(Optimal velocity)を算定するための希望速度(Desired speed)が要求される。ここで、希望速度は道路の幾何構造によって変化しやすく、短い区間での希望速度を求めることは比

較的難しい．そこで，本研究では Generalized Helly model は Lenz model よりも簡単な構造式を持っているので，このモデルで道路の幾何構造による多重の前方車両に対する追従行動と運転者の特性を分析するのが容易と判断し，Generalized Helly model(Bexelius model 含む)のみを適用することとした．

5.3 多重追従行動の定義及び利用データ

多重車両追従行動においては，追従運転者は直前の前方車両だけではなく，複数の前方車両の挙動に応じて追従走行する．多重追従行動に対して本研究では‘多重追従車両の運転者は，同一車線内を走行する複数台の前方車両に着目し，追従挙動に影響を及ぼす刺激として相対速度と相対距離を認知して，その反応の形態として加速や減速を決める’と仮定した．また，明確に追従車両の行動に影響を及ぼす前方車両の台数としては，図 5.1 のように最大‘3 台前までの前方車両’を考慮した．複数台の前方車両を識別するための名称として，追従車両を基準として，一番近い前方車両を 1 番目の前方車両(1 番車両)で，一番遠い前方車両を 3 番目の前方車両(3 番車両)という番号を用いて指定した．

本分析対象区間で抽出した車両軌跡データを用いて，多重車両追従行動を分析するために，まず追従車両を定義した．追従車両の定義は第 4 章で提示したように‘同一車線を走行する前方車両からの車尾時間は 3 秒以内であり，前方車両に対して連続的に走行する車両’と定義した(Hong et al., 2007, 2008)．この追従車両の定義を，追従車両と最大 3 台の前方車両に対しても，同様に適用した．すなわち，各前方の車両と追従車両間の車尾時間は 3 秒以内とした．すなわち，追従車両と 1 番の前方車両間の車尾時間，1 番車両（1 番目の前方車両）と 2 番車両（2 番目の前方車両）間の車尾時間，そして 2 番車両（2 番目の前方車両）と 3 番車両（3 番目の前方車両）間の車尾時間は皆 3 秒以内となるように多重追従挙動を定義し，それに適合する車両群のデータを抽出した．よって，1 番目，2 番目そして 3 番目の前方車両は追従車両からそれぞれ 3 秒以下，6 秒以下，9 秒以下の車尾時間を持つこととなる．

先に定義した基準を用いて多重追従走行挙動の分析のために，本研究では図 5.1 に示すとおり 3 台の前方車両とそれらに追従する車両で構成された車両群を，一つの多重追従車両のセットとして設定し，これを分析対象データとして抽出した．ここでは，一つの多重追従車両のセットについては，追従の継続時間に関して最低値を設けた．すなわち，多重追従セット内の車両群は「同一車線内で 8 秒以上継続して追従する車両」から構成されたとした．その結果，本研究では 656 台の追従車両と前方車両で構成された 164 セット

の多重追従車両を抽出した．ここで，各セット内の追従車両が観察された時間間隔である 0.2 秒ごとに，3 番目の前方車両まで追従した時間は平均 24 秒として，各セット内のデータの平均数は，約 120 plot (平均追従時間/観察された時間間隔)となる．図 5.2 は各多重追従車両のセット別に追従車両の追従時間の分布を提示しているが，各多重追従車両セット内の追従車両は図 5.2 のように 1 番目の前方車両から 3 番目の前方車両まで平均 24sec 間追従していることが分かった．

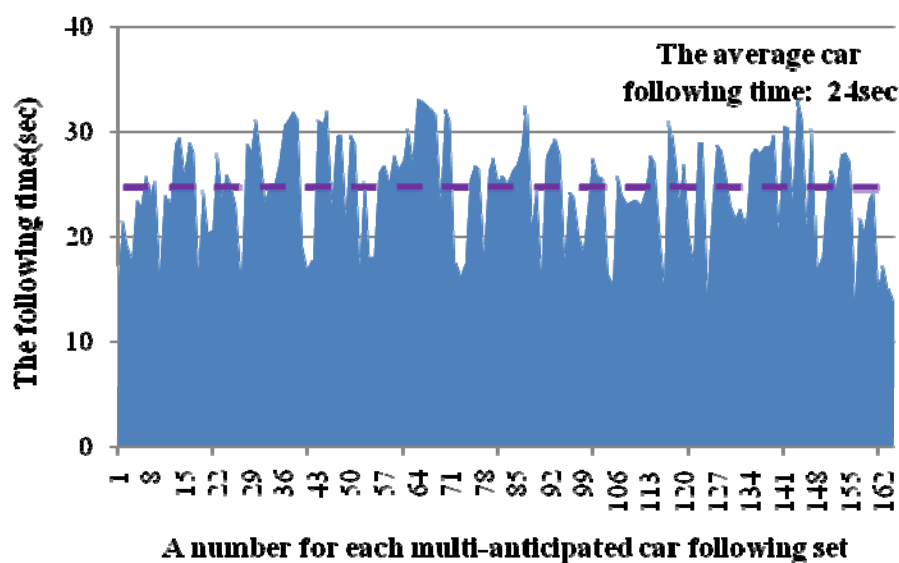


図 5.2 各多重追従車両のセット別追従車両の分布

本研究ではまた，164 個の全多重追従車両のセットに対して，各追従車両とすべての前方車両（1 番目，2 番目，そして 3 番目の前方車両）間の車尾時間の分布を調査した．図 5.3 は追従車両と多重追従状況での各前方車両との間の車尾時間の平均値と分布範囲を示している．ここで，追従車両と 1 番目の前方車両間の車尾時間は 3sec より小さな値の範囲に分布しており，平均値は 1.6sec である．また，追従車両と 2 番目，3 番目の前方車両間の車尾時間はそれぞれ 1.5sec~4.5sec，2.8~7.0sec の範囲で分布しており，平均値は 3.1sec と 4.5sec となった．したがって，多重追従走行挙動モデルを推定するために抽出したデータセットについては，先に定義したことように追従車両と各前方車両間の車尾時間の基準（1 番目，2 番目，3 番目の前方車両と追従車両間の車尾時間がそれぞれ 3 秒以下，6 秒以下そして 9 秒以下）を全て満足することがわかった．

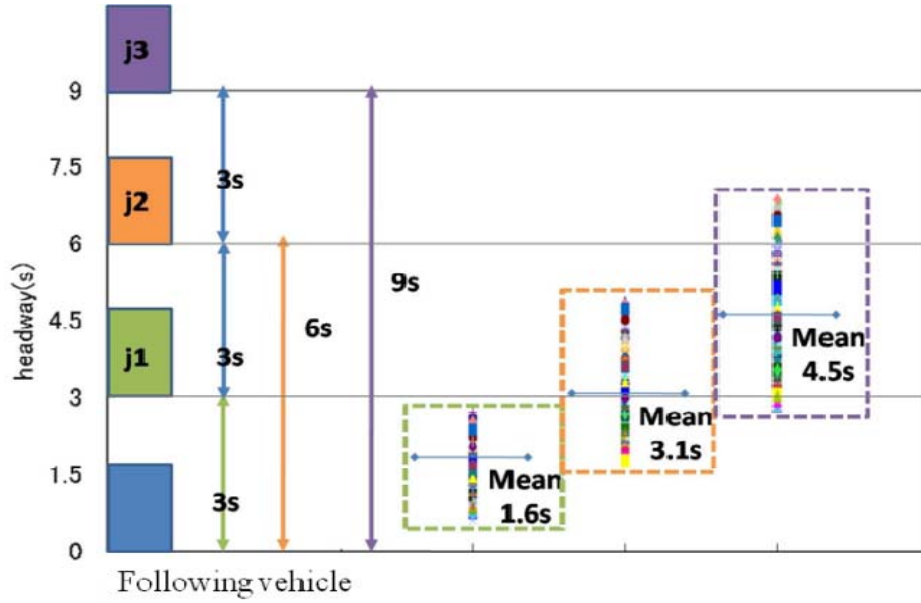


図 5.3 各 j 番目の前方車両と追従車両間の車尾時間

また，本章でも多重追従走行モデルを仮定した下で，道路の幾何構造が追従挙動に及ぼす影響を議論するため，前章図 4.1 で提示したように全体区間を 3 区間（直線区間，カーブ区間そして，合流区間）に分類し，各区間で分割して多重追従車両のデータセットを抽出した．分析の便宜のためにこれらをそれぞれ区間 1, 2, 3 で指定した．したがって，区間 1, 2 そして 3 に対して Generalized Helly model によって推定されたパラメータを比較考察することで，道路の幾何構造が，多重追従挙動を仮定した場合の追従挙動に及ぼす影響について分析する．

5.4 多重車両追従モデルのパラメータの推定方法

Generalized Helly model は式 5.2 で提示したように，モデル推定の際に追従対象とする前方車両の台数を外生パラメータ m_1, m_2 によって特定する必要がある．追従関係式でパラメータ m_1 は分析時に当該車両との相対速度 ($\Delta v_i^{(j)}(t)$: 前方車両の速度-追従車両の速度) を考慮する前方車の台数を意味し，パラメータ m_2 は追従車両が，当該車両との相対距離と希望距離との差 ($\Delta x_i^{(j)}(t) - S_i^{(j)}$: 前方車両の位置 - (追従車両の位置-希望距離)) を考慮する前方車両の台数を表す．本研究では 5.3 節で記述したように，追従車両に影響を及ぼす多重前方車両として 3 台の前方車両を考慮したので，Generalized Helly model のパラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$ を推定するため，外生パラメータ m_1, m_2 の値を $m_1 = 1 \sim 3$, $m_2 = 0 \sim 3$ と設定して， m_1 と m_2 に対して仮定された 12 個の組み合わせ m_1, m_2

(すなわち, $m_1 = 1 \sim 3$, $m_2 = 0 \sim 3$ e.g., (1,0), (1,1), (3,2), (3,3))に対して, 各々パラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$ を推定した. ここで, 5.2 節で提示したように Generalized Helly model の構造式において, 多重前方車両に対する相対速度のみを基本にした Bexelius model を考慮するため, $m_2=0$ になるパラメータの組み合わせを考慮した.

また, パラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$ を推定するためには, 多重前方車両に対する追従車両 (または運転者) の反応時間を設定する必要がある. よって, 本研究では反応時間を観察観測単位時間の 0.2 秒から 0.2 秒ずつ増加させて, 0.2 秒~3.0 秒の値 ($T=0.2 \sim 3.0 \text{sec}$)を持つように設定した. したがって, あらかじめ設定したパラメータ m_1 , m_2 と反応時間の値, すなわち $m_1 = 1 \sim 3$, $m_2 = 0 \sim 3$ と $T=0.2 \sim 3.0 \text{sec}$ を基礎に順次仮定し, Generalized Helly model を利用して各 164 台の多重追従車両のセットごとに 180 個 (12 個のパラメータ m_1 , m_2 の組み合わせと 15 個の反応時間, e.g., (m_1 , m_2 , T)=(1,0,0.2), (1,1,3.0), (3,2,1.4), (3,3,3.0)) の追従モデルに対して Generalized Helly model を想定して, 164 セットの多重追従車両のデータセットごとに最小二乗法を利用して, すべてのパラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$ を推定した. この時, 推定されたモデルの中で各多重追従車両のセットに対するパラメータ m_1 , m_2 の組み合わせ別の最適モデルとしては, 180 個の追従モデルの中で最大決定係数を持っているモデルを選択した.

パラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$ の推定に対して, 本研究では Hoogendoorn et al.(2006,7)によって提案された接近方法を利用した. 一般的に実際の運転者の行動は時間と空間によって変化していると考えられるが, 交通状態の変化に応じる形で追従モデルのパラメータを推定することは難しいといえる. さらに, Brockfeld et al.(2004)と Schultz et al. (2004)は運転者の異質性を考慮することの重要性を提示した. まず, Brockfeld et al.の研究では追従実験から得た 36 個の追従ペアを利用して, 一つ一つ追従ペアごとに 10 種類の異なる追従モデル (例えば, Optimal velocity model, Gipps model, Newell model etc.,) を適用して比較分析した. モデルの推定及び検証結果から, 一つの追従ペアごとに 10 種類のモデルを利用する推定して結果, モデルうち最適モデル(the best model)と最悪モデル(the worst model)の誤差の差が 3%以内で非常に小さく現れた. これは, 10 種類のモデルが各追従ペアの挙動に対して大部分似ている位の説明力を持っていることを意味する. また, 36 個の追従ペアに対して一つ一つ追従ペアに注目して最適モデルの誤差を見れば, 最も誤差が小さい追従ペアは 9.42%, 反対に一番大きい誤差を持つ追従ペアは 20.52%で現れて, 追従者ごとに運転行動の多様性(the diversity)がある可能性を提示した. よって, 論文として運転者の運転行動の多様性(the diversity)はモデルの構造の多

様性よりも大きいということを提示した．また，このような結果から，彼らはおそらくどのようなモデルを使っても運転者の多様性に対して無視できないと主張している．これに関して，Schultz et al. (2004)は遺伝アルゴリズム (the genetic algorithm)を利用して対象区間の追従ペアごとに推定したパラメータの分布のうち，平均値と分散 (measures of central tendency and dispersion)をマイクロシミュレーションである CORSIM にパラメータとして利用した．その結果，彼は推定したパラメータの平均及び分散が観測された運転者行動とシミュレーション(CORSIM)の運転者行動間の差を最小化する値だという結果を提示した．

上記の一連の研究は運転者挙動を分析する際に異質性を考慮することの重要性を提示している．これらの成果を踏まえて，本研究では一歩進め，単独追従行動挙動を仮定するのではなく，多重追従挙動モデル想定して運転者行動の異質性と道路幾何構造が多重追従挙動に及ぼす影響に焦点を当てた．これを分析するため，第3章で提示したように，11台のビデオカメラから抽出したビデオ画像データからの車両軌跡データを利用した．この軌跡データを利用して多重の車両追従モデルを構築し，車両の動きに対する運転者の一人ひとりの異質性を調査した．

5.5 多重追従挙動モデルの推定結果に基づく追従挙動の検証

5.5.1 多重追従モデルの推定結果の分析

本研究では，多重追従行動を分析するために5.3節で示した164個の各多重追従車両のセットに対して，外生パラメータ m_1 , m_2 の組み合わせ別に，それぞれのパラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$ らを推定した．推定するにあたり，あらかじめパラメータ m_1 , m_2 の値をそれぞれ $m_1 = 1 \sim 3$, $m_2 = 0 \sim 3$ で，反応時間 (T)を $0.2 \sim 3.0 \text{sec}$ に設定して，一つの多重追従車両のセットごとにパラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$ を推定した．モデル推定ならびに考察結果の信頼性を高めるため，各多重追従車両セットに対する最適モデルの決定係数(Adjust.R2)が0.5以上の値を持つ追従モデルの推定結果のみを以下では分析考察に利用する．その結果，推定された164個の各パラメータの中で，決定係数(Adjust.R2)の値が0.5以上の最適モデルのパラメータ $\alpha_i^{(j)}$, $\beta_i^{(j)}$, 反応時間(T), および決定係数の平均値が表5.1のように算定された．また，パラメータ m_1 , m_2 による最適モデルを捜すため，164個の各多重追従車両のセットのうちパラメータ m_1 , $m_2 = (1,0) \sim (3,3)$ の組み合わせによって最適モデルとなったセットの数を示した．もしこの値が大きければ，この時のパラメータ m_1 , m_2 の組み合わせ

は本対象区間で観察された個々のドライバーの追従挙動のより多くを説明することが可能と考えられる。

表 5.1 GH model を利用した推定結果とパラメータの平均値

m_1, m_2	パラメータ						反応 時間 (s)	0.5 値より大きい決 定係数 Adjust.R2 (the N. of セット)	各ペア別 最適モデル の数
	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3			
(1,0) Std.dev	0.73 (0.02)						1.02	0.62(65)	-
(2,0) Std.dev	0.47 (0.06)	0.19 (0.03)					1.60	0.67(103)	-
(3,0) Std.dev	0.42 (0.04)	0.16 (0.03)	0.11 (0.02)				1.30	0.78(126)	40
(1,1) Std.dev	0.60 (0.03)			0.07 (0.001)			0.92	0.65(90)	-
(2,1) Std.dev	0.36 (0.04)	0.20 (0.03)		0.05 (0.001)			1.15	0.70(125)	-
(3,1) Std.dev	0.27 (0.05)	0.10 (0.03)	0.07 (0.01)	0.04 (0.001)			1.34	0.75(135)	6
(1,2) Std.dev	0.37 (0.03)			0.04 (0.008)	0.01 (0.003)		0.90	0.68(108)	1
(2,2) Std.dev	0.27 (0.03)	0.13 (0.02)		0.06 (0.007)	0.02 (0.002)		1.20	0.76(132)	8
(3,2) Std.dev	0.23 (0.05)	0.13 (0.04)	0.09 (0.03)	0.05 (0.007)	0.02 (0.002)		1.26	0.82(139)	38
(1,3) Std.dev	0.37 (0.04)			0.08 (0.007)	0.04 (0.004)	0.02 (0.002)	0.93	0.74(109)	8
(2,3) Std.dev	0.28 (0.06)	0.16 (0.03)		0.08 (0.009)	0.04 (0.006)	0.01 (0.003)	1.32	0.79(136)	15
(3,3) Std.dev	0.26 (0.08)	0.18 (0.04)	0.09 (0.02)	0.06 (0.007)	0.04 (0.005)	0.02 (0.002)	1.39	0.83(142)	48

表 5.1 のように、パラメータ m_1, m_2 の数が増加する時、164 セットの多重追従データで個別にパラメータ推定した際の決定係数(Adjust.R2)の平均値は一定の増加傾向を示していることが分かる。パラメータ m_1, m_2 の組み合わせのうち、最大 3 番目の前方車両まで考慮したモデル、すなわち外生パラメータ $(m_1, m_2)=(3,2), (3,3)$ である追従モデルの決定係数が 0.82 と 0.83 という高い値であり、追従挙動の説明力から見れば、最適な組み合わせであると判断できる。反対に、多重ではなく 1 番目の前方車両だけの相対速度と相対距離を考慮した外生パラメータ m_1, m_2 の組み合わせ、すなわち $(m_1, m_2)=(1,0), (1,1)$ の場合の決定係数の平均値は、それぞれ 0.62 と 0.65 であり、外生パラメー

タ m_1, m_2 の全ての組み合わせの中で最も低い値を持つことが確認された。このような結果は、1 番目の前方車両のみを考慮した単独追従車両モデル ($m_1, m_2=(1,0), (1,1)$) より、多重前方車両の相対速度と相対距離を考慮した多重追従車両モデル ($m_1, m_2=(3,2), (3,3)$) の方の説明力がより高い可能性を示唆している。すなわち、本研究対象区間の追従挙動は、単独車両追従モデルよりも多重車両追従モデルによってよりよく説明される可能性が高い、ということを示している。

以上より、本研究対象区間における追従行動を最もよく説明する最適モデルの候補としては、パラメータ m_1, m_2 の組み合わせの中でも決定係数(Adjus t.R2)が一番高いモデル $m_1, m_2=(3,2), (3,3)$ のいずれかであることが示されたが、この 2 つの組み合わせの中で最適モデルを選定するために、164 セットの多重追従データセットを用いて個別に推定したモデルの中で、 $m_1, m_2=(3,2), (3,3)$ のいずれがより多く最適モデルとなるか、その数を比べた。その結果、 $m_1, m_2=(3,3)$ のモデルの方が $m_1, m_2=(3,2)$ のモデルよりも最適モデルの数が多いことが確認され、3 番目の前方車両までの相対速度と相対距離を全て考慮したモデルの方が、より適合性が高いという結論に至った。

また、表 5.1 で提示したパラメータ α_j, β_j の値は全て統計的に有意で、適切な符号を持つことが確認された。さらに、推定されたパラメータ α_j, β_j の平均値は、追従車両から一番近い 1 番目の前方車両から一番遠い 3 番目の前方車両へ行くほど、その値が減少する傾向を示している (e.g., $m_1, m_2=(3,2)$ の場合、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の値が 0.23, 0.13, 0.09 と単調に減少している)。この結果は、追従車両の運転者は自分の車両と最も近い前方車両の行動に一番敏感に反応して追従するということを意味する。

5.5.2 単独追従行動に対する多重追従行動の検証

前項では、パラメータ m_1, m_2 の組み合わせごとに 164 個の多重車両追従モデルに対する決定係数の平均値について比較し、多重追従挙動モデルの方が単独追従挙動より、本対象区間の追従関係をよりよく説明することがわかった。しかし、本研究では各 164 個の多重追従車両のデータセットごとに個別に、モデルのパラメータ推定を行っており、モデルの各推定結果についてそれぞれの決定係数の値を持っている。つまり外生パラメータ m_1, m_2 により定義されるモデルごとに、それぞれ決定係数に対する分布を持っているため、明確に多重追従行動の方が単独追従行動よりも追従関係をよく説明することを、この点を考慮して証明する必要がある。したがって、本研究では 2 つのモデル間の決定係数に差が存在することを証明するため、決定係数の分布を持った 2 つのモデル (単独追従モデルと多重追従車両モデル) に対し、単純

な平均値の比ではなく paired t-test を利用してその差異を検証した。

検証に対する帰無仮説(null hypothesis)としては‘単独追従モデルと多重追従モデル間の決定係数(Adjust.R²)の差の平均は 0 である.’となる。決定係数の差に対する検証のために、先ず単独追従モデルとしては外生パラメータ (m_1, m_2)=(1,0), (1,1)のモデルの決定係数の値を、多重追従モデルとしては (m_1, m_2)=(3,2), (3,3)のモデルの値を選択した。表 5.2 で示された検定結果から、単独追従モデルと多重追従モデル間の各 t-statistics は単独追従モデルと多重追従行動間に決定係数について、統計的に有意な差異があるという点を示す。また、単独追従モデルの場合は決定係数の値が約 0.4~0.6 の値に集中して分布しているが、多重追従モデルは図 5.4 のように大部分の決定係数の値が 0.8~1.0 の範囲に多く存在していることが確認された。このような一連の結果は、多重追従モデルの方が単独追従モデルよりも、本分析対象区間における追従行動をよく説明できる可能性があることを示唆する。また追従車両の運転者は 1 番目の前方車両だけではなく、2 番目や 3 番目の前方車両の行動にも応じて追従するという経験的な証拠を示している。

表 5.2 単独と多重追従車両モデル間の Paired t-test の結果及び比較

m_1, m_2 (Single model)-(Multi model)	Range of R ² value (全 164 セット)	T
(1,0) - (3,2)	0.44 - 0.79	-18.216
(1,0) - (3,3)	0.44 - 0.81	-14.982
(1,1) - (3,2)	0.53 - 0.79	-14.800
(1,1) - (3,3)	0.53 - 0.81	-12.932

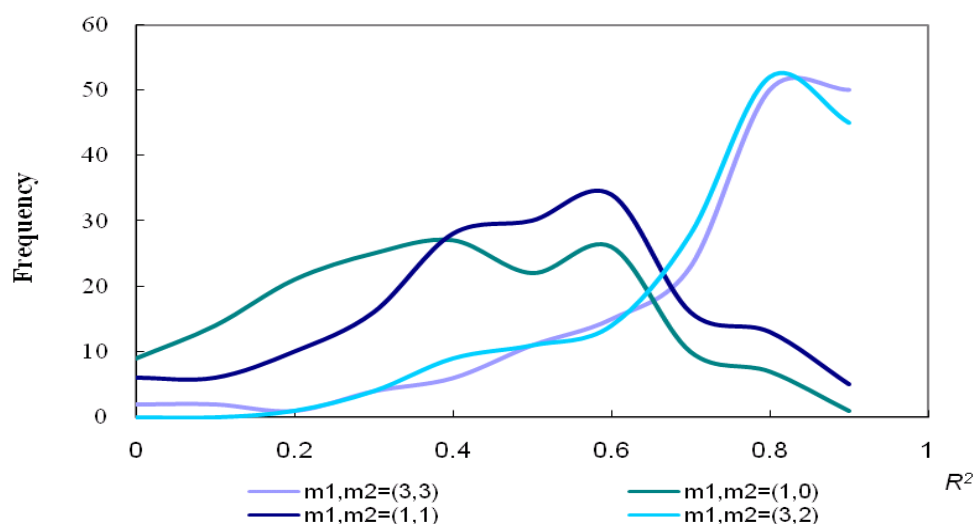


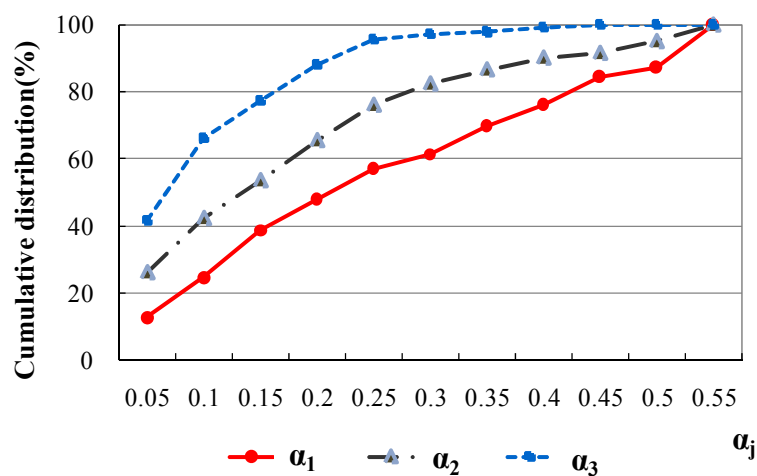
図 5.4 各単独および多重車両追従モデルの決定係数の分布

5.6 運転者間の異質性の分析

5.6.1 推定パラメータの分布の比較

5.5 節では，多重追従挙動モデルを仮定して，都市高速道路の合流部を含む分析区間の追従挙動を記述する方が，単独追従挙動を仮定する場合に比べて，車両の挙動をよりよく説明できる可能性が高いことが分かった．本節ではさらに，予測された多重追従行動での運転者間の異質性に対して議論する．ここでは外生パラメータ m_1 , m_2 の組み合わせの中で，最適モデルの $(m_1, m_2)=(3,3)$ のモデルに対するパラメータ α_j, β_j と反応時間 (T) の分布に対して分析した．その際には，分析結果の信頼性を高めるために，全 164 個の多重追従車両のセットの中で決定係数 (Adjust.R²) の値が 0.5 以上である 142 個の多重追従車両のセットのみを利用した．図 5.5 は，パラメータ α_j, β_j と反応時間に対する累積分布 (cumulative distribution) を表している．

分析の結果，同じ連続的なパラメータ α_j, β_j ，すなわち同じ $\alpha_j(\alpha_1 \sim \alpha_3)$, $\beta_j(\beta_1 \sim \beta_3)$ の中で，1 番目の前方車両と追従車両間のパラメータ α_1, β_1 がそれぞれ最大の値となることがわかった．これはパラメータ α_1, β_1 ，つまり 1 番目の前方車両と追従車両間の相対的な関係が，追従車両の行動に最も大きな影響を及ぼすということを示している．言い換えれば，追従車両は自分の車両を基準として，より遠方の前方車両と比較して最も近い 1 番の前方車両から最も強い影響を受けて追従走行している可能性が高いことを意味する．また，推定された全てのパラメータ α_j, β_j と反応時間 (T) の値は図 5.5 のように広く分布しており，これは車両追従行動における前方の車両に対する運転者間の多様性を提示している．



(a) α_j ($\alpha_1 \sim \alpha_3$)

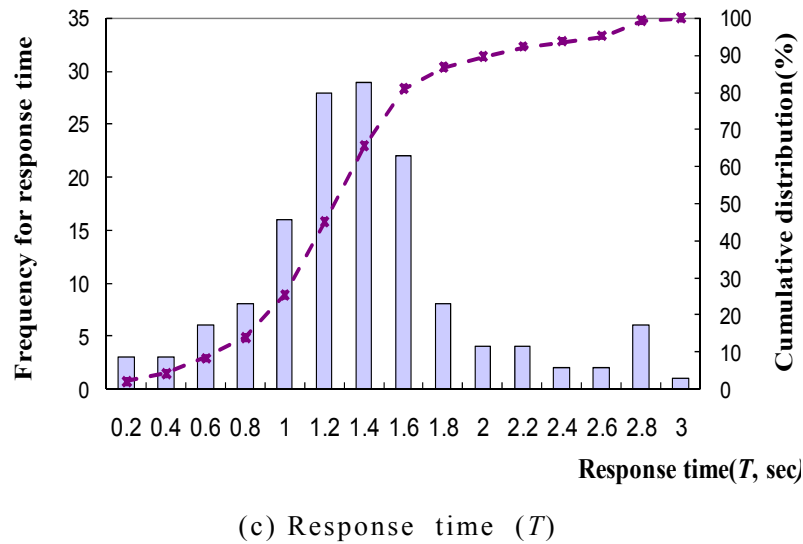
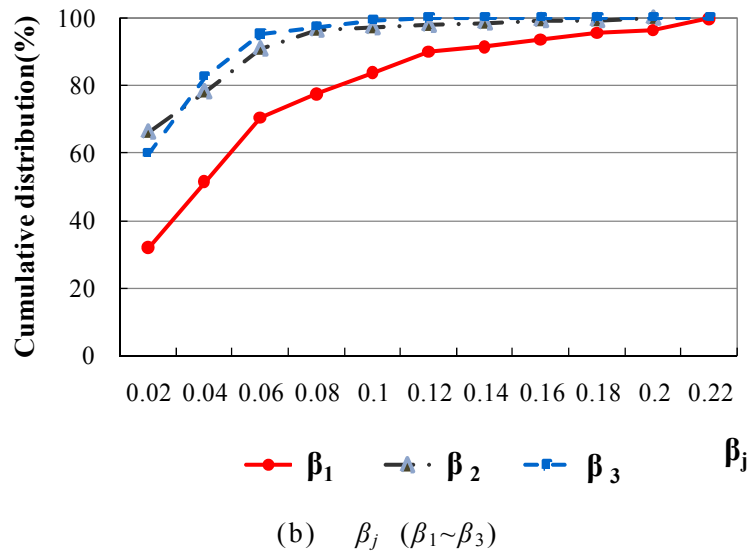
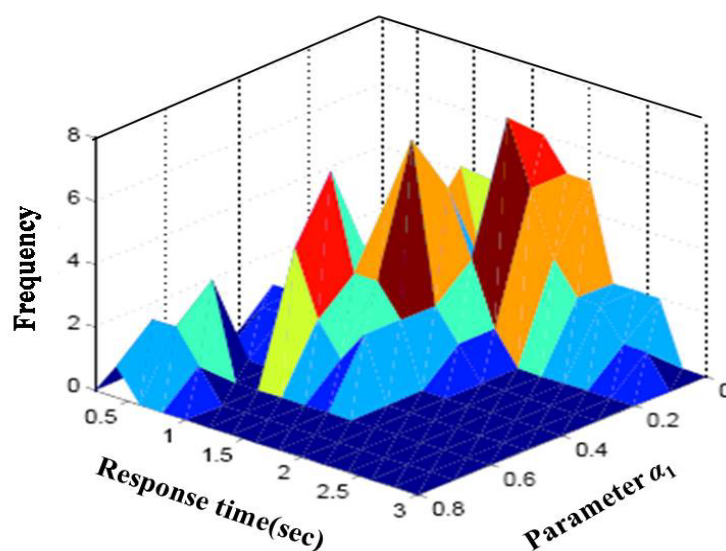


図 5.5 パラメータと反応時間の分布

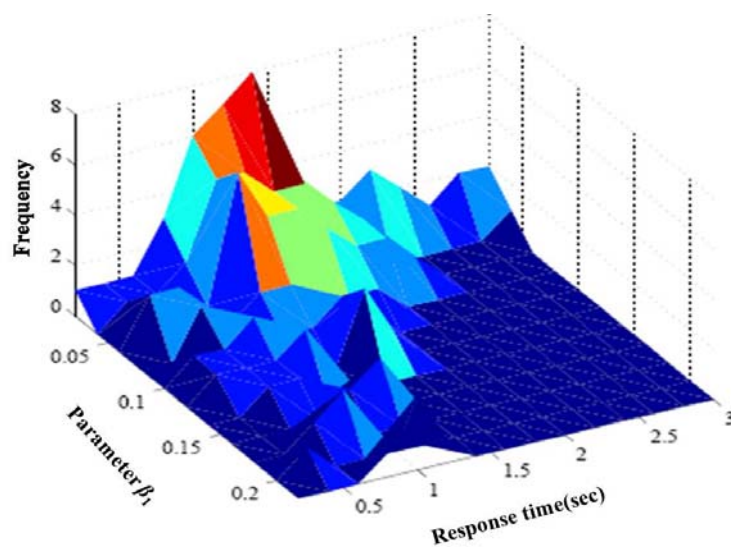
また，パラメータ α_j, β_j 間の関係を分析するために，1 番目の前方車両に対するパラメータ (α_1, β_1) と反応時間 (T) 間の関係を比較した．ここで，1 番目の前方車両のみを考慮して関係を比べる理由は先に示したように，前方車両の中で 1 番目の前方車両が追従車両に対して最大の影響力を持っており，1 番目の前方車両も 2 番目や 3 番目の前方車両を追従して走行するので，2 番目や 3 番目の前方車両のパラメータと反応時間の分布は 1 番目の前方車両の分布と似ていると考えられるからである．図 5.6 は 1 番目の前方車両の影響を表すパラメータ α_1, β_1 の値に対する反応時間 (T) 間の頻度分布を示している．

図 5.6 で比較した結果から，反応時間はパラメータ α_1, β_1 の値が増加するほど短くなる傾向が示されている．このような傾向は特にパラメータ α_1 の場合

に顕著である．これは追従車両の運転者が 1 番目の前方車両との相対速度と相対距離に対して感度高く反応する場合，運転者の反応時間は短くなる傾向にあるといえる．このようなパラメータと反応時間間の関係は，多様な運転者の行動が存在することを表しており，最適モデル $m_1, m_2=(3,3)$ においても，パラメータ間の多様な関係は運転者間の異質性の存在を意味する．



(a) Response time(T) and parameter α_1



(b) Response time(T) and parameter β_1

図 5.6 パラメータ α_1, β_1 と反応時間間の分布

5.6.2 運転者の行動のクラスタ化

本節では運転者間の追従行動に対する異質性をさらに具体的に分析するた

め、推定したパラメータを基に、いくつかのグループに分類できる可能性について検証した。そのために、予測されたパラメータ α_j, β_j に対してクラスタ分析(Cluster analysis)と主成分分析(Principal component analysis)を行った。分析の結果、クラスタ分析によって追従車両毎に推定したパラメータは最終的に3つのクラスタに分類(グループ化)された。また分類(グループ化)された3つのクラスタに対して、運転者の特性を理解するために本研究では主成分分析を行った。分析の結果、表 5.3 に示すように2つの主成分(principal components)の固有値(Eigen value)が1.0より大きい値を持つこと結果となり、この2つの主成分により累積寄与率は66.2%に達している。この2つの主成分は統計的に意味があるものと考えられる。

表 5.3 パラメータ $m_1, m_2=(3,3)$ のモデルに対する主成分分析の結果

Principal Component	Initial Eigen values		
	Total	% of Variance	Cumulative %
1	2.171	41.686	41.686
2	1.017	24.501	66.187
3	0.935	11.547	77.734
4	0.865	9.422	87.156
5	0.821	9.683	96.839
6	0.190	3.161	100

表 5.3 のように抽出された2つの主成分(principal components)に対して、抽出された要因の特性を分析するために、表 5.4 のように各主成分毎にパラメータの主成分得点と各要因の寄与率について調べた。2つの要因の固有値(Eigen value)は2.171および1.017であり、寄与率はそれぞれ41.79%と24.50%となった。各要因に対するパラメータの主成分得点を比べると、1番目の軸(主成分1)ではパラメータ α_1 と $\beta_1 \sim \beta_3$ の値が2番目の軸に比べて相対的に大きく、2番目の軸(主成分2)ではパラメータ α_2 と α_3 の得点が1番目の要因に比べて大きい結果となった。よって、1番目の軸(主成分1)は追従運転者が1番目の前方車両に対する相対速度と3台のすべての前方車両に対する相対距離との関係が強い主成分を意味しており、主成分2は、主成分1と比較して2番目、3番目の前方車両に対する相対速度との関係が強い主成分を意味する。したがって、この2つの主成分を用いて、3クラスターに分類された運転者の行動特性について分析する。具体的には、第1主成分および第2主成分を軸とした座標平面を想定し、各追従車の推定パラメータを用いて、表 5.3 の係数により主成分得点を算出し、それを座標平面上にプロットする。

表 5.4 組み合わせ $m_1, m_2=(3,3)$ 中の最適モデルに対する要因分析の結果

Parameters within $m_1, m_2=(3,3)$		Component	
		1 st axis(Principle 1)	2 nd axis(Principle 2)
Factor Score for each parameter	α_1	0.545	-0.221
	α_2	-0.109	0.767
	α_3	0.146	0.579
	β_1	0.562	-0.031
	β_2	0.780	0.443
	β_3	0.794	0.365
Initial Eigen values		2.171	1.017
% of Variance		41.788	24.502
Cumulative %		41.788	66.289

第 1・第 2 主成分からなる座標平面上に、各追従車の推定パラメータから算出した主成分得点をプロットした図が、図 5.7 である。分析の結果、クラスタ 1 内の運転者は 1 番目の軸（主成分 1）に対しては小さな値をとるが、2 番目の軸（主成分 2）に対しては比較的大きい値をとることがわかる。これは、クラスタ 1 内の運転者は追従の際、1 番目の前方車両よりも、2 番目や 3 番目の前方車両を相対的に注視して追従する可能性があることを意味する。

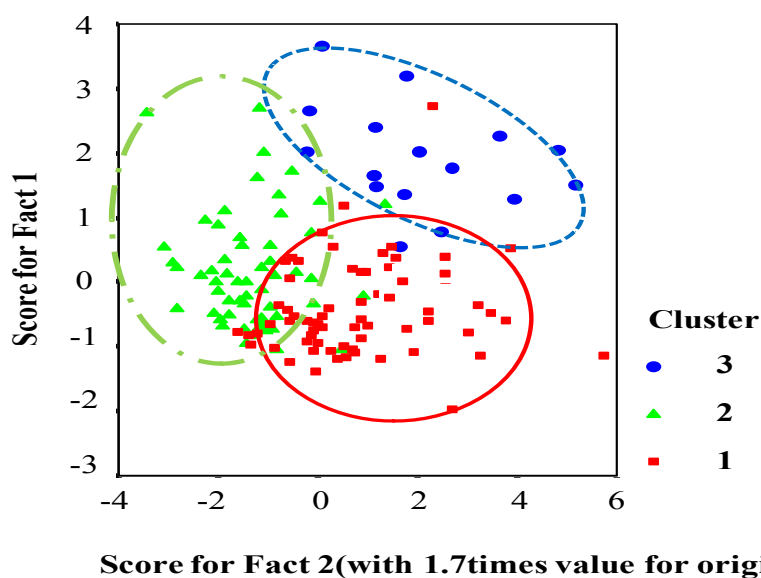


図 5.7 クラスタ別に要因 1,2 に対する分散図

また，クラスタ 2 内の運転者は，クラスタ 1 の結果とは反対に，1 番目の軸（主成分 1）に対しては比較的大きい値を示すが，2 番目の軸（主成分 2）に対しては小さな値を持つことがわかる．これはクラスタ 2 内の追従車両の運転者が，1 番目の前方車両の相対速度に注意を払い追従走行している可能性が高いことを意味する．最後に，クラスタ 3 内の追従走行する運転者たちは全て，1 番目の軸（要因主成分 1）だけでなく，2 番目の軸（要因主成分 2）に対しても大きい値をとっており，全ての前方車両たちの相対速度と相対距離に対して注目して追従する可能性が高いことを意味している．

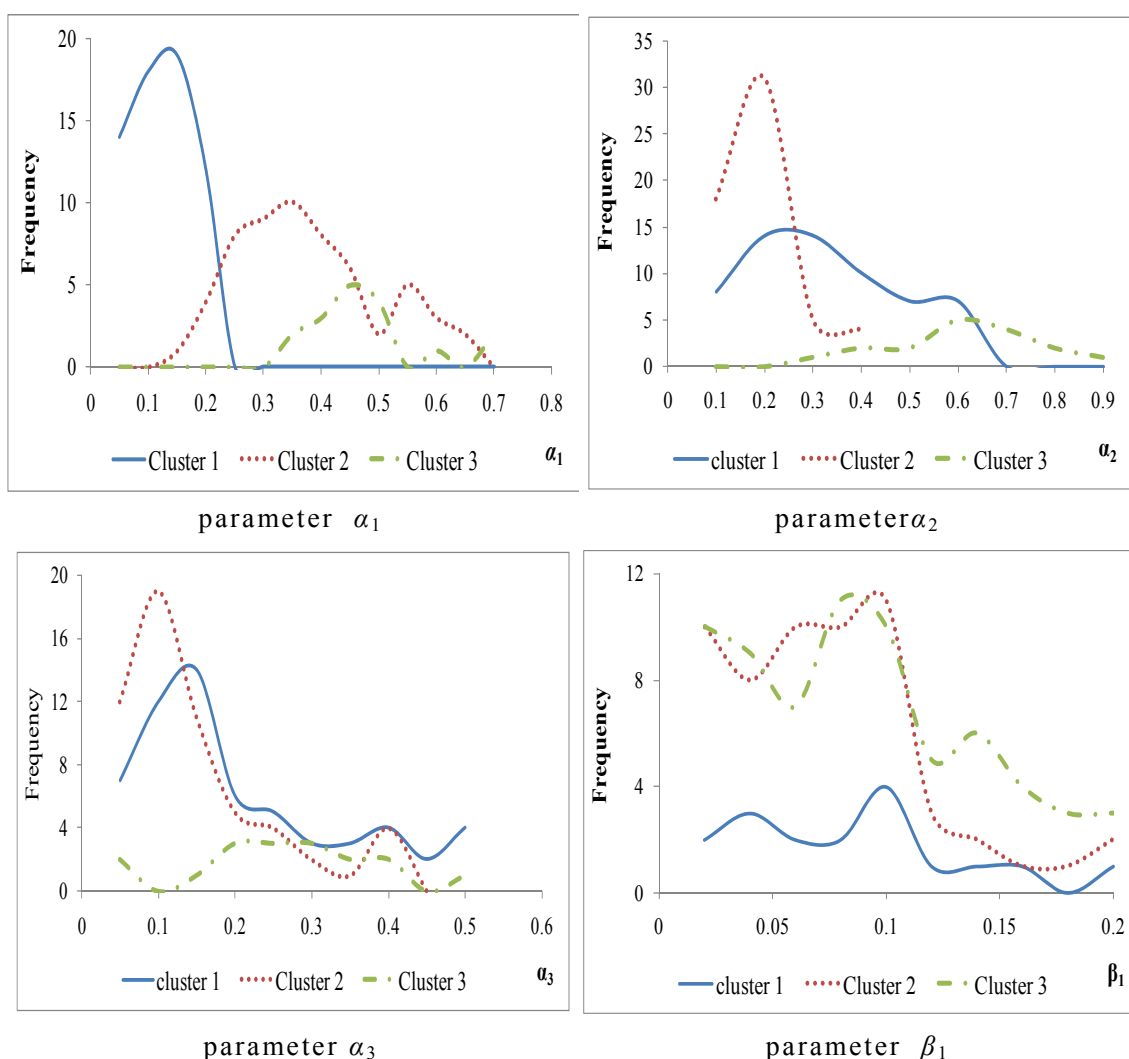
5.6.3 多重追従挙動モデルを仮定した場合の追従車両の反応の差異

追従挙動における運転者の異質性を分析するため，先の 5.6.2 項では運転者の追従行動を 3 つのクラスタに分類して，大きく分類してもクラスタごとに多様な運転者の行動が存在するということを示した．本項では分類した 3 つのクラスタに対して，各クラスタ別の追従車両が多重前方車両の相対速度と相対距離に対する反応の差異に着目して論議する．これを分析するため，先ず各クラスタ別のパラメータの平均値とそれに対する変動係数(CV, coefficient of variance)を求めて比較した．比較分析した結果，表 5.5 と図 5.8 に示すようにクラスタ 3(●)内の推定された追従パラメータの平均値は，他のクラスタに比べて値が大きいだけでなく，小さな変動係数(CV)の値を持つことがわかった．また，クラスタ 1(■)とクラスタ 2(▲)の間のパラメータの平均値に着目すると，クラスタ 2 内のパラメータ α_1 , β_1 , β_2 そして β_3 に対する平均値はクラスタ 1 よりも大きいことが明らかとなり，反対に，2 番目や 3 番目の前方車両との相対速度の関係を説明するパラメータ α_2 と α_3 の平均値は小さいことがわかった．

表 5.5 各クラスタにおいて推定されたパラメータの平均値

Cluster		1(■)	2(▲)	3(●)
Num of cases within each cluster		63	58	17
average value of parameter(CV)	α_1	0.11(0.57)	0.38(0.35)	0.56(0.39)
	α_2	0.29(0.63)	0.11(0.87)	0.59(0.40)
	α_3	0.18(0.82)	0.12(0.93)	0.23(0.68)
	β_1	0.076(0.71)	0.077(1.05)	0.099(0.93)
	β_2	0.060(1.02)	0.071(0.75)	0.165(0.52)
	β_3	0.043(0.96)	0.046(0.93)	0.097(0.67)
Average value of Adjust.R2 for each cluster		0.80	0.78	0.85

このような結果は，クラスタ 1 内の追従運転者は，1 番目の前方車両より 2 番目や 3 番目の前方車両との相対速度により比較的敏感に応じる傾向があることを示している．同様に，クラスタ 2 内の追従車両は 1 番目の前方車両との相対速度よりも敏感に応じる傾向があることを意味している．また，多重前方車両との相対距離が追従挙動に及ぼす影響を説明する β_j ($\beta_1 \sim \beta_3$) に対して，まずクラスタ 1, 2 を比較すれば，クラスタ 2 の β_2 と β_3 はクラスタ 1 よりパラメータの値が大きいことを分かった．反対に，パラメータ β_1 はクラスタ 1, 2 において類似な値を持つ傾向が示された．これは，クラスタ 1, 2 内の追従運転者は皆 1 番目の前方車両との相対距離に似たり寄ったりに応じるが，2, 3 番目の前方車両にはクラスタ 2 の運転者がクラスタ 1 より比較的に敏感に応じる傾向があることを示している．また，クラスタ 3 は全般的に，パラメータと決定係数の値が他のクラスタに比べてより大きいから，これは全てのパラメータに応じて追従する傾向を持ったグループであることを意味する．



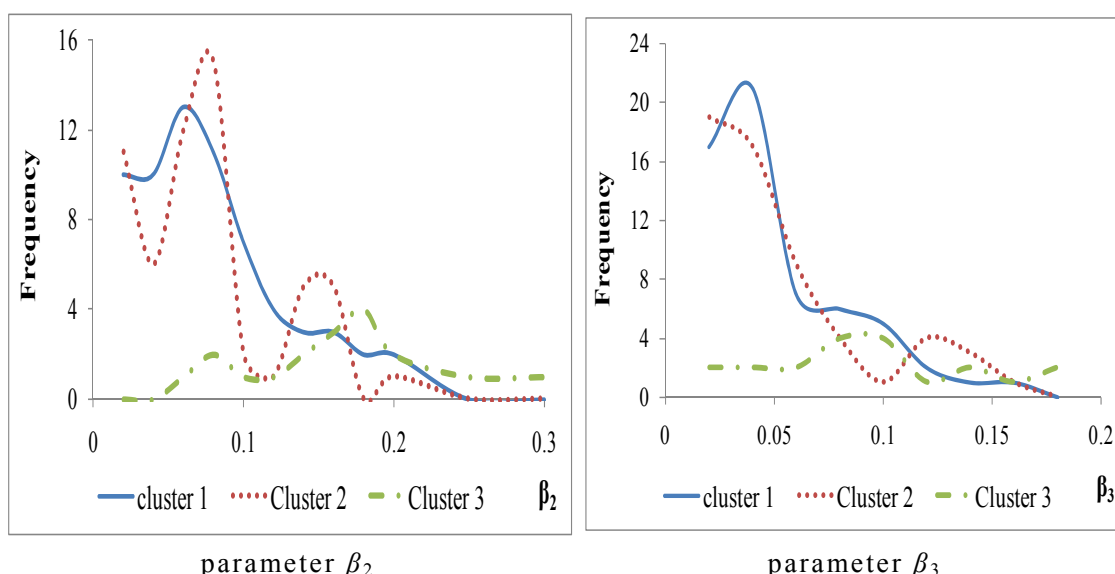


図 5.8 パラメータ $m_1, m_2=(3,3)$ モデル内の各パラメータの頻度分布

表 5.5 と図 5.8 のように、クラスタ 3 の全てのパラメータの値は他のクラスタに比べて大きい値を持つ傾向が確認されるが、クラスタ 1, 2 に属する追従車のパラメータの特性は明らかに違う．すなわち、クラスタ 1 と 2 の間の追従特性は異なる可能性が高いということを意味する．この結果を踏まえて、クラスタ 1, 2 間で追従特性が異なる結果となる要因について検討してみる．それをために、本研究では運転者は交通与件及び状況により影響を受けて走行すると仮定して、次のような仮説を立てた．

仮説: 各クラスタ内の運転者の追従挙動は、追従に影響を及ぼす要因（i.e. 各クラスタの交通状況）により影響を受け、前方車両との相対速度や相対距離に対する反応が異なるものとなる．

この仮説を証明するため、本研究では、交通状況を代表することができる指標として、各クラスタ内の追従車両と前方車両との車尾時間の平均値と分布について調べた．図 5.9 に示した結果のように、クラスタ 1 と 2 の間の車尾時間の平均値と分布は異なり、クラスタ 1 (-----) における追従車両とすべての前方車両(1, 2, そして 3 番目の前方車両)との **time-headway** はクラスタ 2 (—) より小さな値を持つことが確認された．この結果から、クラスタ 1, 2 は交通状況の点で異なると推測できる．すなわち、クラスタ 1 内の多重追従車両セットは相対的に小さな車尾時間で構成されており、クラスタ 2 に比べて交通状況という点では密度が高く不安定な交通状況である可能性が高いと判断できる．その結果、クラスタ 1 の運転者は、1 番目の前方車両のみに注意

を払うのではなく、2 番目および 3 番目前方車両の挙動（特に相対速度）に注意を払い、追従走行していることを示す追従パラメータが得られた可能性が高い。

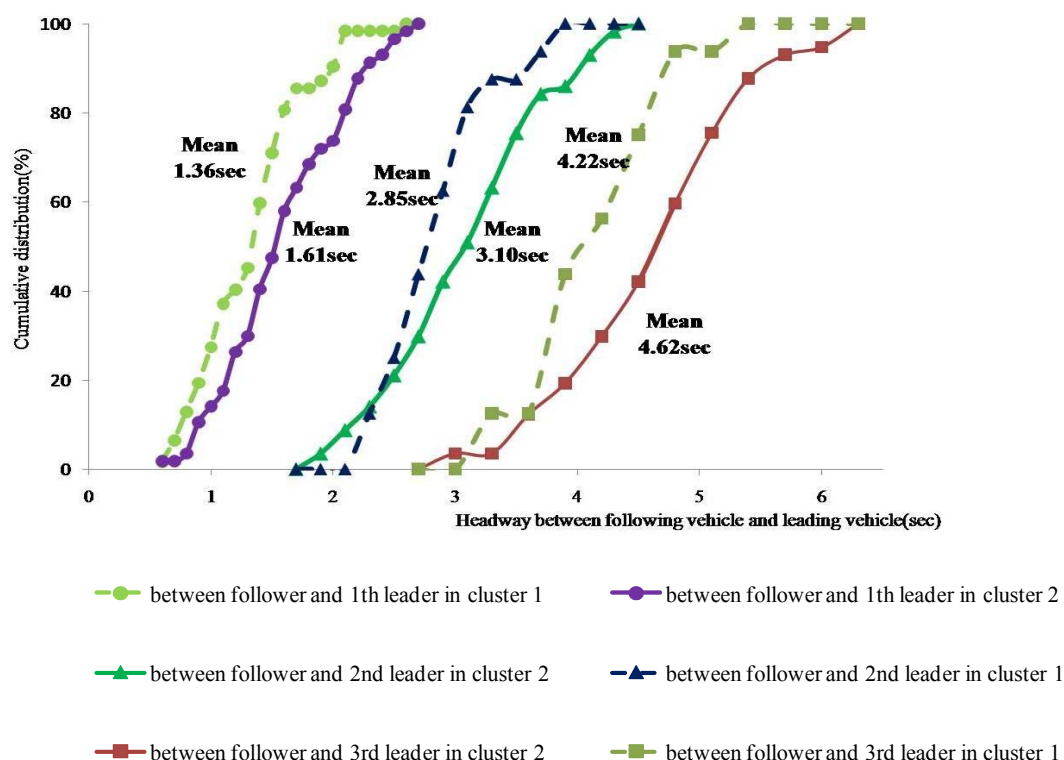


図 5.9 各クラスタ内の追従車両と前方車両との time-headway の平均値と分布

言い換えると、クラスタ 2 内での運転者はクラスタ 1 に比べて相対的に車尾時間が多い状況下で追従しており、2 番目、3 番目の前方車両の行動に必ずしも注目して走行しなくても安全に追従することができる可能性が高く、1 番目の前方車両の行動に最も影響を受けて走行するということを意味する。反対にクラスタ 1 内で運転者は、クラスタ 2 に比べて短い time-headway で構成されているため、1 番目の前方車両だけでなく 2 番目、3 番目の前方車両も追従車両に及ぼす影響が大きい。これは、クラスタ 1 内の追従運転者は、これら前方車両全てに応じて走行する可能性が大きいということを示唆する。結論として、追従運転者の行動は交通状況より影響を受け手いと考えられる。すなわち、各クラスタの運転者の追従挙動は、交通状況によって影響を受け、多重前方車両の挙動に対する反応が異なるものとなる可能性が高いといえる。

以上の分析結果から、本研究では次のような結論に至る。

- 1) 多重追従モデルを想定した場合、多重前方車両に対して追従車両は多様な推定パラメータと反応時間値をとる。
- 2) 各追従車両にパラメータ推定した結果に対して、クラスタ分析ならびに主成分分析を適用し、本分析対象区間の追従挙動は大別して3つのグループに分類される可能性が提示された。
- 3) 各クラスタに推定されたパラメータから多様な運転者の追従行動があることが明らかとなり、これは運転者間の追従行動に対する異質性が存在するということを表している。
- 4) 交通状況が運転者の追従挙動に影響を及ぼしている可能性が考えられる。特に相対的に高密度な交通状況下にあるクラスタでは、1番目前方車のみならず、2番目、3番目前方車の挙動にも注意を払い追従走行している可能性が示された。

5.7 道路幾何構造による多重追従行動の分析

5.5 節と 5.6 節では、多重追従挙動モデルが単独追従挙動モデルよりも、分析対象区間の追従走行挙動をよく説明していることを示すとともに、多重追従挙動モデルを仮定した場合も、追従挙動には異質性が存在するということを示した。本節では、運転者の追従挙動に影響を及ぼす要因として、道路の幾何構造特性に着目し、多重追従挙動モデルを仮定し、推定パラメータの差異に注目した。道路の幾何構造特性を考慮するため、4 章の図 4.1 で示したものと同様に分析対象区間をそれぞれ直線区間、カーブ区間、そして合流区間に分類した。全 164 個の多重追従車両セットを直線、カーブ、合流区間毎にデータを分割し、各区分別の多重追従車両セットに該当するデータをそれぞれ 118 セット、144 セット、138 セットを抽出した。また、先に記述した 5.4 節で示した方法を同様に適用して、各多重追従車両セットに対するパラメータ m_1 , m_2 の組み合わせの中で決定係数(Adjust.R²)の平均値が最大となるモデルを最適モデルで選定した。

5.7.1 区分別多重車両追従モデルの比較

直線、カーブおよび合流の各区分別に抽出した多重追従車両セットに対して、Generalized Helly model を適用して、各区分における 12 個の外生パラメータ m_1 , m_2 の組み合わせごとに、パラメータ α_j , β_j を推定した。表 5.6～5.8 はそれぞれ、直線、カーブ、そして合流区間に対するパラメータ m_1 , $m_2=(1,0) \sim (3,3)$ のモデル別に推定されたパラメータと反応時間の平均値、

そして各多重追従車両セットに対する最適モデルの数を示している．どの範囲の前方車両の影響を考慮するかを表す外生パラメータ m_1, m_2 の組み合わせの中から最適モデルを選定するため，区間別に決定係数が高く追従挙動を相対的によく説明できるモデルを選び出した．すなわち，直線区間の場合は $m_1, m_2=(3,1), (2,2)$ ，カーブ区間の場合は $m_1, m_2=(2,2), (3,3)$ ，そして合流区間の場合は $m_1, m_2=(3,2), (3,3)$ のモデルを選出し，さらに比較分析した．その結果，直線区間の場合 $m_1, m_2=(3,1)$ が，カーブと合流区間の場合は $m_1, m_2=(3,3)$ のモデルが，各区間の多重追従データセットに対して，最適モデルとして選択されるケースが最も多く，全体的に適合度が高いことがわかった．よって，全ての区間において 1 番目の前方車両のみならず，2 番目，3 番目の前方車両の挙動の影響を考慮したモデルが，各区間のそれぞれの追従車両の行動をよく説明することが分かる．

また，5.5 節で示したように，パラメータ $m_1, m_2=(3,3)$ の多重追従モデルが道路の幾何構造の差異を考慮せずに，実際の追従行動を説明する場合には，最も高い説明力を持っていた．一方本節では，直線区間での最適モデルは $m_1, m_2=(3,1)$ であり，3 番目の前方車両まで全て考慮した $m_1, m_2=(3,3)$ モデルよりも $m_1, m_2=(3,1)$ のモデルが直線区間での追従行動をよく説明する可能性があることが分かる．一方，カーブと合流区間においては，パラメータ $m_1, m_2=(3,3)$ である多重の追従モデルが相変らず最適モデルとして選定された．この結果より，直線区間での運転者の行動は，1 番目の前方車両から 3 番目の前方車両までの相対速度と，1 番目の前方車両との相対距離のみを利用するだけで十分に追従行動を説明できるということを意味する．反対に，直線区間と比べて運転者に相対的に多くの負荷がかかるであろう，カーブと合流区間の追従行動は，1 番目の前方車両だけではなく，2 番目や 3 番目の前方車両との相対速度と相対距離を全て反映した多重追従挙動モデルによってよく説明されることが示される．これは，運転者はカーブと合流区間において，道路の幾何構造ならびに車両間の相互作用の影響により発生する運転負荷のために，より前方の車両の挙動にまで注意を払って走行する必要があるということを意味している．したがって，道路幾何構造の特性は各区間の追従車両の多重追従行動に影響を及ぼす可能性が高いということがわかる．

表 5.6 区間別の最適モデルに対する予測パラメータの比較(直線区間)

Parameter m_1, m_2	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	Response time(s)	R ² value more than 0.5	The N.of best model by each pair
(1,0)	0.66						1.22	0.66	1
Std.dev	(0.03)								
(2,0)	0.42	0.20					1.60	0.67	4
Std.dev	(0.05)	(0.04)							
(3,0)	0.39	0.18	0.15				1.65	0.78	6
Std.dev	(0.04)	(0.03)	(0.02)						
(1,1)	0.47			0.08			1.40	0.65	2
Std.dev	(0.04)			(0.002)					
(2,1)	0.38	0.20		0.06			1.60	0.72	9
Std.dev	(0.05)	(0.04)		(0.003)					
(3,1)	0.33	0.15	0.13	0.05			1.63	0.78	25
Std.dev	(0.05)	(0.03)	(0.01)	(0.001)					
(1,2)	0.39			0.06	0.03		1.31	0.68	7
Std.dev	(0.05)			(0.01)	(0.008)				
(2,2)	0.33	0.16		0.05	0.01		1.53	0.77	23
Std.dev	(0.06)	(0.04)		(0.009)	(0.007)				
(3,2)	0.27	0.13	0.11	0.05	0.01		1.63	0.73	12
Std.dev	(0.09)	(0.08)	(0.08)	(0.009)	(0.007)				
(1,3)	0.40			0.06	0.02	0.01	1.45	0.72	9
Std.dev	(0.07)			(0.008)	(0.008)	(0.006)			
(2,3)	0.31	0.16		0.08	0.02	0.01	1.59	0.75	14
Std.dev	(0.13)	(0.09)		(0.008)	(0.006)	(0.005)			
(3,3)	0.28	0.13	0.10	0.05	0.02	0.01	1.58	0.74	11
Std.dev	(0.17)	(0.13)	(0.13)	(0.008)	(0.006)	(0.005)			

表 5.7 区間別の最適モデルに対する予測パラメータの比較(カーブ区間)

Parameter m_1, m_2	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	Response time(s)	R ² value more than 0.5	The N.of best model by each pair
(1,0)	0.63						1.09	0.66	3
Std.dev	(0.04)								
(2,0)	0.46	0.23					1.56	0.68	-
Std.dev	(0.06)	(0.05)							
(3,0)	0.42	0.17	0.13				1.59	0.69	3
Std.dev	(0.06)	(0.07)	(0.05)						
(1,1)	0.55			0.08			1.22	0.70	6
Std.dev	(0.04)			(0.003)					
(2,1)	0.40	0.22		0.05			1.45	0.71	4
Std.dev	(0.07)	(0.05)		(0.004)					
(3,1)	0.35	0.18	0.14	0.05			1.51	0.73	7
Std.dev	(0.08)	(0.09)	(0.07)	(0.005)					

表 5.7 続き

(1,2)	0.42			0.07	0.05		1.20	0.68	-
Std.dev	(0.06)			(0.008)	(0.006)				
(2,2)	0.36	0.17		0.07	0.05		1.48	0.78	32
Std.dev	(0.08)	(0.07)		(0.008)	(0.006)				
(3,2)	0.30	0.15	0.13	0.07	0.06		1.61	0.76	24
Std.dev	(0.10)	(0.11)	(0.10)	(0.007)	(0.007)				
(1,3)	0.43			0.06	0.03	0.01	1.25	0.73	9
Std.dev	(0.07)			(0.10)	(0.008)	(0.006)			
(2,3)	0.34	0.17		0.06	0.03	0.02	1.58	0.75	30
Std.dev	(0.11)	(0.10)		(0.009)	(0.007)	(0.005)			
(3,3)	0.30	0.15	0.13	0.06	0.03	0.01	1.63	0.78	35
Std.dev	(0.14)	(0.15)	(0.15)	(0.008)	(0.005)	(0.002)			

表 5.8 区間別の最適モデルに対する予測パラメータの比較(合流区間)

Parameter m_1, m_2	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	Response time(s)	R ² value more than 0.5	The N.of best model by each pair
(1,0)	0.69						1.08	0.65	6
Std.dev	(0.06)								
(2,0)	0.51	0.40					1.32	0.69	4
Std.dev	(0.06)	(0.03)							
(3,0)	0.48	0.38	0.21				1.43	0.73	8
Std.dev	(0.06)	(0.06)	(0.06)						
(1,1)	0.58			0.14			1.09	0.69	-
Std.dev	(0.05)			(0.004)					
(2,1)	0.45	0.29		0.12			1.38	0.73	1
Std.dev	(0.07)	(0.04)		(0.005)					
(3,1)	0.41	0.26	0.18	0.09			1.30	0.76	3
Std.dev	(0.09)	(0.09)	(0.10)	(0.009)					
(1,2)	0.47			0.10	0.07		1.17	0.70	-
Std.dev	(0.06)			(0.008)	(0.002)				
(2,2)	0.41	0.26		0.10	0.06		1.30	0.76	-
Std.dev	(0.10)	(0.10)		(0.006)	(0.006)				
(3,2)	0.35	0.22	0.15	0.08	0.05		1.43	0.80	37
Std.dev	(0.17)	(0.20)	(0.19)	(0.009)	(0.008)				
(1,3)	0.47			0.07	0.05	0.03	1.19	0.76	15
Std.dev	(0.12)			(0.10)	(0.008)	(0.007)			
(2,3)	0.42	0.27		0.07	0.05	0.02	1.41	0.78	20
Std.dev	(0.21)	(0.20)		(0.009)	(0.006)	(0.002)			
(3,3)	0.36	0.21	0.14	0.07	0.04	0.02	1.40	0.81	51
Std.dev	(0.28)	(0.30)	(0.32)	(0.003)	(0.002)	(0.002)			

5.7.2 区間別最適モデルのパラメータの比較

5.7.1 項では、区間別に外生パラメータ m_1 , m_2 の組み合わせ毎に、多重追従データセットを用いて個別に、多重追従モデルのパラメータを推定し、決定係数を求めた。この決定係数の大きさ（平均値）と、各外生パラメータ m_1 , m_2 の組み合わせ毎の最適モデルの適合数を比べて、直線、カーブ、合流の各区間ごとに多重追従行動を最もよく説明する最適モデルを選定した。分析の結果、直線区間では m_1 , $m_2=(3, 1)$ モデルが、カーブ区間と合流区間では m_1 , $m_2=(3,3)$ が最適モデルであった。ここでは区間別の多重追従行動を比べるために、区間別最適モデルを利用してパラメータ α_j , β_j を比較分析した。表 5.9 と図 5.10 では、3 区間の最適モデルについて、推定されたパラメータの平均値と分布を提示している。

(1) パラメータ α_j ($\alpha_1 \sim \alpha_3$) の比較

表 5.9 では、各区間毎の最適モデルのパラメータ (α_j , β_j) に着目し、推定されたパラメータの平均値と、同種のパラメータを仮に合計して、それを 100% とした場合の各パラメータの構成割合を示している。パラメータ α_j ($\alpha_1 \sim \alpha_3$) の場合は全ての区間でパラメータ α_2 , α_3 よりパラメータ α_1 が、平均値および構成割合について大きい値を持つことが分かった。ここから、全ての区間で運転者は他の前方車両よりも 1 番目の前方車両の相対速度に最も敏感に応じて、追従走行していることが分かった。直線区間の場合、パラメータ α_1 の値は 0.33 としてパラメータ α_2 (0.15), α_3 (0.13) と比較すれば、それぞれ約 2 倍、3 倍の大きさを α_1 が有することが分かる。このような傾向は、合流区間（パラメータ α_1 の該当割合:49%）に比べて直線(54%)とカーブ区間(51%)の場合に、より顕著に表れている。

次に、区間別にパラメータ α_2 , α_3 の平均値と構成割合を見れば、直線区間の場合は、0.15(24%)と 0.13(21%)で、カーブ区間の場合 0.15(25%)と 0.13(22%), そして合流区間の場合は 0.21(29%)と 0.14(22%)であり、これは決して無視することができない大きさの値である。この結果から、2 番目、3 番目の前方車両との相対速度が追従車両に対して及ぼす影響も存在することがわかった。これはパラメータ α_2 , α_3 の値は 1 番目の前方車両に対するパラメータに比べて小さいが、2,3 番目の前方車両も追従車両に影響を及ぼすと考えられるため、本分析対象区間においては多重追従挙動を想定して、追従挙動をモデル化することは有用であることを示している。

表 5.9 区間別の推定結果の比較

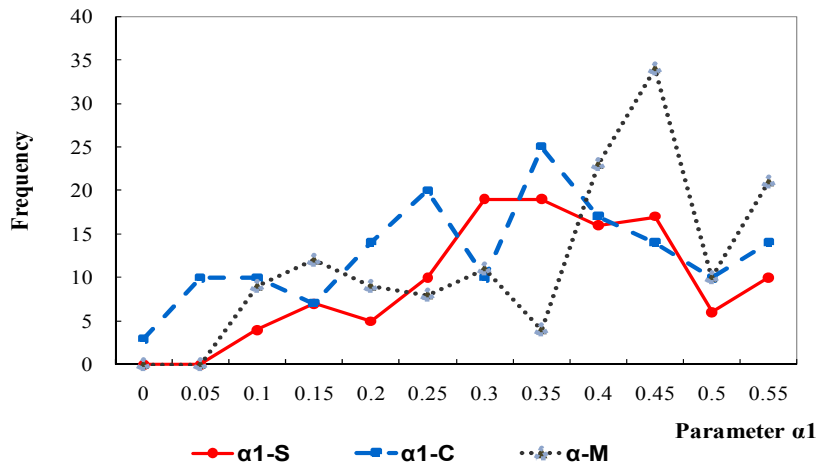
Section	Parameters	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	Response time(s)	Adjust _R ²
Straight	$m_1, m_2=(3,1)$	0.33	0.15	0.13	0.05			1.53	0.78
	Comparison	54%	24%	21%	0.004				
		100%(0.33+0.15+0.13)							
	Standard dev.	0.08	0.07	0.06					
Curved	$m_1, m_2=(3,3)$	0.30	0.15	0.13	0.06	0.03	0.01	1.63	0.78
	Comparison	51%	25%	22%	1	2 times ↓	6 times ↓		
		100%(0.30+0.15+0.13)							
	Standard dev.	0.14	0.15	0.15	0.008	0.005	0.002		
Merging	$m_1, m_2=(3,3)$	0.36	0.21	0.14	0.07	0.04	0.02	1.30	0.81
	Comparison	49%	29%	22%	1	1.8times ↓	3.5times ↓		
		100%(0.36+0.21+0.14)							
	Standard dev	0.02	0.03	0.03	0.003	0.002	0.002		

区間別にパラメータの影響力を比較すると、全般的に合流区間のパラメータの平均値と該当割合が、直線やカーブ区間に比べても大きい値を持つことで現われたが分かった。また、直線やカーブ区間の場合は1番目の前方車両と2番目、3番目の前方車両とのパラメータの該当割合の差が、直線区間は30%と33%、カーブ区間は26%と29%と、合流区間(20%,27%)に比べて大きいことがわかる。このことから、直線やカーブ区間の場合は合流区間に比べて、2番目や3番目の前方車両よりも1番目の前方車両の走行行動挙動が、追従車両の行動挙動に相対的に大きな影響を及ぼしている可能性が高いことが示される。反対に、合流区間で走行する追従車両は1番目の前方車両だけではなく2,3番目の前方車両との相対速度と相対距離に応じながら追従するので、これらの前方車両が追従車両に及ぼす役割が明確に表れていることがわかる。

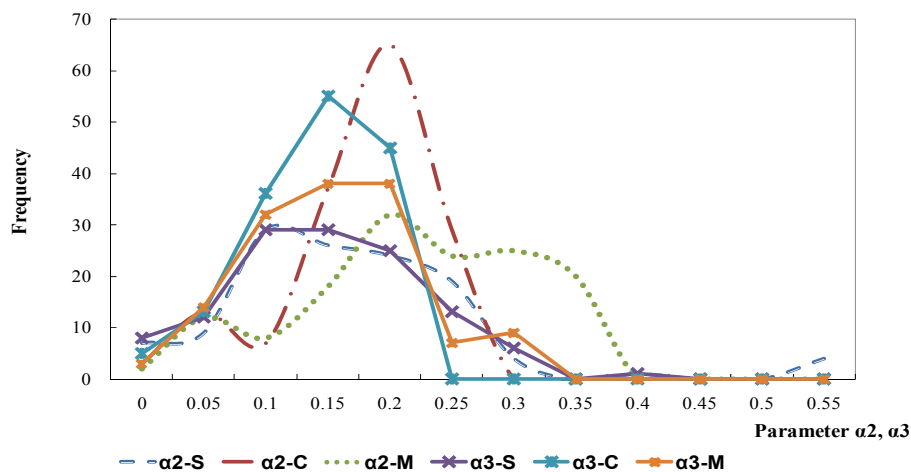
(2) パラメータ β_j ($\beta_1 \sim \beta_3$) の比較

相対距離に関するパラメータ β_1 を比べた結果、相対速度に関するパラメータ α_j ($\alpha_1 \sim \alpha_3$) に比べて明確な傾向は見えないが、カーブと合流区間でパラメータ β_2 , β_3 の値は1番目の前方車両に対する β_1 よりも小さな値を持つことがわかる。しかし3区間（直線、カーブ、そして合流区間）において、このパラメータの値は、絶対値から見れば大きくはないが、確かに存在している。また曲線と合流区間を比べると、全般的に合流区間でのパラメータ β_2 , β_3 の値

はカーブ区間に比べて大きい値を持つことが分かった。カーブ区間の場合は、2番目や3番目の前方車両のパラメータの値が、1番目の前方車両に比べてそれぞれ1/2倍、1/6倍と小さく、合流区間の場合にはそれぞれ1/1.8倍、1/3.5倍程度に小さいことが分かった。これは合流区間において2番目や3番目の前方車両との相対距離は、追従車両の挙動を決めるにあたってカーブ区間に比べて大きな役割を果たしているといえる。この結果から、追従車両の行動において2番目や3番目の前方車両に対する相対速度や相対距離の影響は、全区間において寄与することが明らかである。また、2番目や3番目の前方車両に対するパラメータの値はパラメータ β_1 よりも小さいが、追従行動において多重追従行動の役割を無視することはできず、これを考慮して追従行動を分析することで追従行動をよりよく表現できるといえる。



(a) α_j (α_1 for all sections)



(b) α_j ($\alpha_2 \sim \alpha_3$ for all sections)

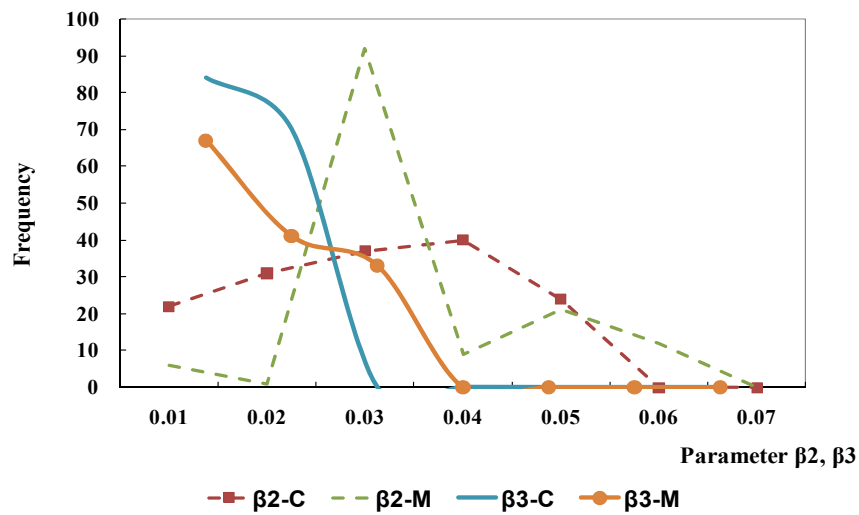
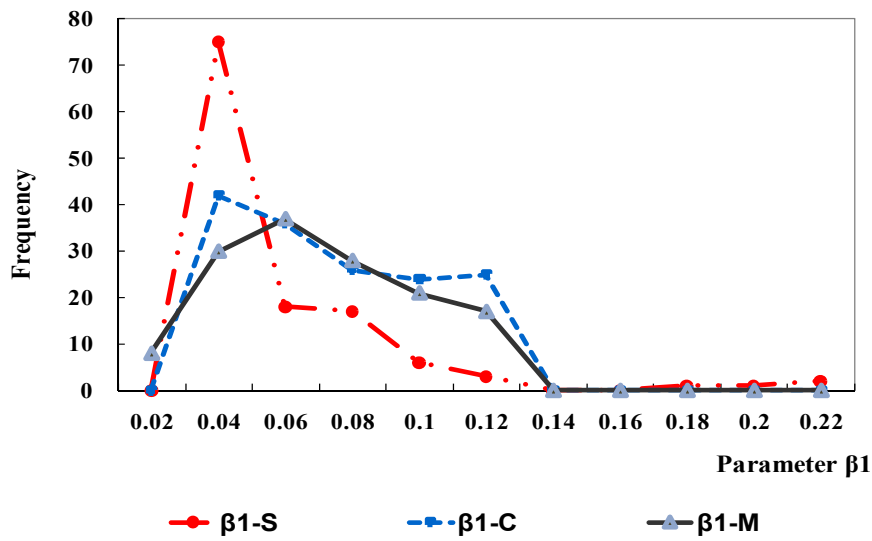


図 5.10 パラメータと反応時間の分布

これらの分析結果から，次の結論を下すことができる．

- 1) パラメータ α_j , β_j の比較から，直線，カーブ，合流の全ての区間において，2 番目や 3 番目の前方車両よりも 1 番目の前方車両の挙動の方が，追従車両の挙動に大きな影響力を持つことがわかった．
- 2) 一方，追従車両は 1 番目の前方車両の挙動だけではなく 2 番目や 3 番目の前方車両の挙動にも応じて追従する．したがって，2 番目や 3 番目の前方車両が追従車両に及ぼす影響を無視することはできない．
- 3) 直線やカーブ区間の場合，2 番目や 3 番目の前方車両より 1 番目の前方

車両の走行行動の方が追従車両の行動に大きな影響を及ぼしており、反対に合流区間で走行する追従車両は、1 番目の前方車両だけではなく 2, 3 番目の前方車両との相対速度と相対距離に応じながら追従するので、これらの前方車両が追従車両に及ぼす役割がより大きい。

5.7.3 区間別平均反応時間の比較

区間別の各パラメータの比較から、追従車両がその挙動を注視している前方車両の範囲には、車両間で多様性があるとともに、道路の幾何構造によっても異なる可能性があることを 5.7.1 および 5.7.2 項で提示した。本項ではさらに、運転者間に多様な追従行動が存在するということを証明するため、区間別に外生パラメータ (m_1, m_2) の組み合わせに対する最適モデルについて、その反応時間の分布と平均値を調べた。表 5.10 は、各区間（直線、カーブ、そして合流区間）における外生パラメータ m_1, m_2 の組み合わせ別に、反応時間の平均値を示している。分析の結果、2 番目や 3 番目の前方車両を考慮した多重車両追従モデル $m_1, m_2=(3,1), (3,3)$ は 1 番目の前方車両のみを考慮した単独車両追従モデル $m_1, m_2=(1,0), (1,1)$ よりも反応時間が長いことが明らかとなった。これは、1 番目の前方車両だけではなく多重の前方車両に対して応じて走行する追従車両は、見かけ上、反応時間が長くなる傾向があるということを意味する。より前方の車両の挙動に注意を払う追従車両は、2 番目あるいは 3 番目車両の挙動より、交通状況の変化を予め把握できるため、直前の車両の挙動に急ぎ反応する必要性が低いとも考えられる。

また区間別に比べた結果からは、直線区間が他の区間より反応時間が長いことに比べて、最も短い反応時間を持って応じる追従車両は合流区間で多く観測されることも分かった。この結果は、合流区間を走行する追従車両は、比較的他の区間の追従車両よりも前方車両に対して敏感に応じて走行することを意味している。

表 5.10 3 区間における m_1 , m_2 の組み合わせ別の反応時間平均

m_1, m_2 \ Section	Response time, t-value(One sample test)		
	Straight section	Curved section	Merging section
(1,0)	1.22(10.88)	1.09(11.60)	1.08(13.15)
(2,0)	1.60(19.20)	1.56(20.02)	1.32(16.39)
(3,0)	1.65(20.20)	1.59(20.36)	1.43(18.57)
(1,1)	1.40(15.74)	1.22(15.68)	1.09(14.69)
(2,1)	1.60(21.78)	1.45(17.79)	1.38(18.19)
(3,1)	1.63(20.17)	1.51(19.15)	1.30(17.43)
(1,2)	1.31(13.96)	1.20(15.32)	1.17(15.97)
(2,2)	1.53(21.05)	1.48(19.46)	1.30(17.29)
(3,2)	1.63(20.14)	1.61(20.79)	1.43(19.39)
(1,3)	1.45(17.38)	1.25(14.43)	1.19(17.19)
(2,3)	1.59(20.91)	1.58(19.27)	1.41(19.90)
(3,3)	1.58(19.27)	1.63(20.32)	1.40(20.65)

表 5.10 の結果から，区間別の反応時間の差が存在するという結果が得られた．しかし，区間別の 164 個の多重追従車両セットは外生パラメータ m_1 , m_2 組合せで定義されるモデルごとに，それぞれ反応時間に対する分布を持っているためから，明確に区間ごとに反応時間に有意な差が存在するということを証明する必要がある．よって，本研究では各区間の間で（直線-カーブ，直線-合流，カーブ-合流）の反応時間には差があることを証明するため，直線区間の最適モデルとしては $m_1, m_2 = (3,1)$ ，カーブ区間および合流区間の最適モデルとしては $m_1, m_2 = (3,3)$ を選択し，反応時間の分布について単純に平均値の比較ではない paired t-test を利用してその差を検証した．検証に対する帰無仮説(null hypothesis)は次の通りである．帰無仮説は‘各区間（直線，カーブ，そして合流区間）間の反応時間の差の平均は 0 である’になる．

表 5.11 に示した検定結果から，各区間の間の t-statistics は区間別の反応時間には確かに差があることを示している．また図 5.11 に示すように合流区間の場合は反応時間の値が 0.2~1.6sec に集中して分布しているが，直線とカーブ区間の場合は大部分の反応時間の値がそれぞれ 1.4~1.8, 1.6~2.0sec に向かうことで現われた．この結果は，直線，カーブ，合流区間の反応時間の分布は全て異なっていることを意味している．追従行動において，直線区間は一番反応時間が長く，合流区間の場合は一番短い反応時間が必要となることを意味する．これは合流区間では直線やカーブ区間に比べて相対速度と相対距離に敏感な追従行動をする追従車両が多いからと判断できる．

表 5.11 各三つの区間別に反応時間に対する Paired t-test の結果

m_1, m_2 by each section	((3,1)-S)- ((3,3)-C)	((3,1)-S)-((3,3)-M)	((3,3)-C)- ((3,3)-M)
Mean of response time	(1.63)-(1.63)	(1.63)-(1.40)	(1.63)-(1.40)
t-value	1.973	5.322	3.932

Where, S: straight section, C: Curved section, M : Merging section

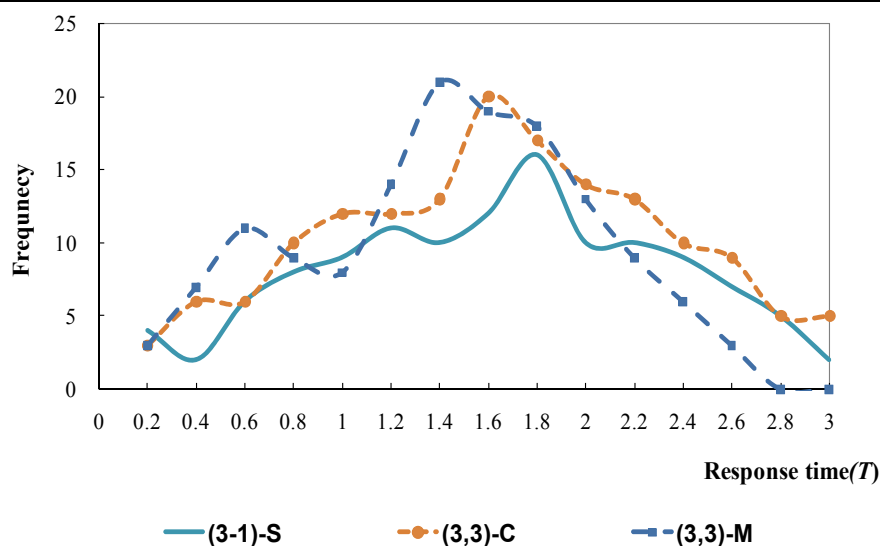


図 5.11 3 区間別のパラメータ m_1, m_2 による最適モデルの反応時間の分布

5.8 結論

本章では 11 個のカメラから得たビデオ画像の車両軌跡データを利用して、都市高速道路合流部における追従挙動を、での多重追従行動挙動モデルを仮定して構築し、推定パラメータに基づき分析を行った。そのために、多重車追従モデルの中で **Generalized Helly model** を適用し、最大 3 台の前方車両まで考慮することとした。164 個の多重追従車両セットに対して、最小二乗法を利用して、考慮する前方車両の範囲を表すパラメータ m_1, m_2 の組み合わせごとに、相対速度の影響を表すパラメータ α_j 、相対距離の影響を表すパラメータ β_j を各々推定した。推定の結果、164 個の多重追従車両セットに対して推定されたパラメータそれぞれの分布が得られ、基本的に推定パラメータは全て統計的に有意であった。このことから本章では、実際の追従行動を把握するため、推定したパラメータに基づき、単独追従行動挙動モデルと多重追従行動挙動モデルを比較分析した。

また、多重追従行動モデルの推定パラメータに対して主成分分析とクラスター分析を行って、運転者間の追従行動の異質性と追従行動の分類の可能性について理解を試みた。さらに、道路の幾何構造が多重追従行動に及ぼす影響

に関しても分析をした。

上で示した分析の結果から得た知見は次の通りである。

- 1) 本分析対象区間の追従行動は、多重車両追従モデルの方が単独車両追従モデルよりもよく説明できることがわかった。これは運転者が直前の前方車両だけでなく、2番目や3番目の前方車両の行動に応じて追従するということを意味する。
- 2) 一般的に1番目の前方車両の行動は、2番目や3番目の前方車両よりも、追従車両に及ぼす効果大きいことがわかった。しかし、追従行動をよりよく理解し説明するためには、2番目や3番目の前方車両が及ぼす効果も無視できない。
- 3) 追従車両の運転者に対するパラメータ α_j , β_j と反応時間の多様な分布から、運転者間の追従行動の異質性が見て取れる。
- 4) 主成分分析とクラスタ分析から、追従行動が分類できることの可能性を示された。また各クラスタによって運転者の追従行動が多様であることがわかり、追従行動に対する運転者間の追従行動に対する異質性が存在することを証明した。
- 5) 道路の幾何構造の特性は、追従行動の区間別の最適多重追従モデルに影響を及ぼす。これは追従行動分析の際には、道路の幾何構造の特性を考慮して分析する必要があることを示唆している。

上で示した本分析での知見は、現在のマイクロシミュレーションに重要な意味を持つ。このような多重車両追従モデルは、多重前方車両と道路の幾何構造を考慮して追従行動をよく説明しているにもかかわらず、現在のシミュレーションモデルは多重前方車両だけではなく、道路の幾何構造による特性も考慮していない。したがって今後の研究では、十分な車両の軌跡データから、さらに多重の前方車両を含む多重追従車両モデルを構築する必要があるといえる。

参考文献

- [1] 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則, 大谷武彦. 高速道路単路部渋滞発生時の交通現象解析, 土木計画学研究・講演集, No.21(2), pp.905-908, 1998.
- [2] 大口敬. 高速道路単路部渋滞発生解析－追従挙動モデルの整理と今後の展望－, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp39-51, 2000.
- [3] 大庭孝之, 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和. 渋滞流における追従挙動モデルの検証, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.43IV, pp.252-253, 1988.
- [4] 尾崎晴男. 自動車の追従走行挙動に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.375-380, 1991.
- [5] Hoogendoorn, S.P., Ossen, S. and Schreude, M. “Empirics of multi-anticipative car following behavior”, *Transportation Research Record*, No.1965, pp.112-120, 2006.
- [6] Brockfeld, E., and Kuhne, R.D. et al., “Calibration and validation of microscopic traffic flow models” *Presented at 83th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2004.
- [7] Schultz, G. and Rilett, L. “An analysis of the distribution and calibration of car following sensitivity parameters in microscopic traffic simulation models”, *Presented at 83th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2004.
- [8] Kurauchi, F., Queiroz, I.N.F., Iida, Y. and Higatani, A. “Traffic flow analysis using image processing technique”, *Proceeding of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service*, Vol.2, pp.329-338, 2006.
- [9] Brackston M. and McDonald, M. “Car-following: A historical review”, *Transportation Research Part F*, pp.181-196, 1999.

- [10] Gazis, D.C., Herman, R. and Rothery, R.W. "Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow", *Operation Research*, Vol. 4, pp.545-567, 1961.
- [11] Kometani E. and Sasaki, T. "Dynamic behavior of traffic with a nonlinear spacing-speed relationship", *In proceedings of the Symposium on theory of traffic flow Research Laboratories, General Motors*, pp.105-119, 1959.
- [12] Helly, W. "Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow", *In Proceedings of the symposium on theory of traffic flow, Research Laboratories, General Motors*, pp.207-238, 1959.
- [13] Michaels, R.M. "Perceptual factors in car following", *In proceedings of the second international symposium on the theory of road traffic flow*, pp.44-59, 1963.
- [14] Kikuchi C. and Chakroborty, P. "Car following model based on a fuzzy inference system", *Transportation Research Record*, 1365, pp.82-91, 1992.
- [15] Bando, M. et al, "Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation", *Physical Review E* 51, pp.1035-1042, 1995.
- [16] Lenz, H., Wanger, C.K. and Sollacher, R. "Multi-anticipative car-following model", *The European Physical Journal B*(7), pp.331-335, 1999.
- [17] Bexelius, S. "An extended model for car-following", *Transportation Research*, Vol.2, pp.13-21, 1968.
- [18] Ossen, S. and Hoogendoorn, S.P. "Car following behavior analysis from microscopic trajectory data", *In Transportation Research Record*, No.1934, 2005, pp.13-21.
- [19] Ossen, S., Hoogendoorn, S.P. and Gorte, B. "Inter-driver differences in car following: a vehicle trajectory based study", *Presented at 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2006.
- [20] Hoogendoorn, S.P., Ossen, S. and Schreuder, M. "Properties of a

- microscopic heterogeneous multi-anticipative traffic flow model”, *Transportation and Traffic Theory* 2007, pp.583-606.
- [21] Hong, D.H., Uno, N. and Kurauchi, F. “Empirical analysis of driver’s Car following heterogeneity based on video image data”, *The Twelfth International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, pp.401-410, 2007.
- [22] Chandler, R.E., Herman, R. and Montroll, E.W. “Traffic Dynamic: Studies in Car following”, *Operations Research*. Vol.6, pp.165-184, 1958.
- [23] Herman R. and Rothery, R.W. “Car following and steady-state flow”, *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, Ed J. Almond, O.E.C.D., Paris, 1969.
- [24] Forbes, T., Zagorshki, H., Hoishouser, E. and Deterline, W. “Measurement of driver reactions to tunnel condition”, *Highway Research Board Proceedings* 37, pp.345-357, 1958.

第 6 章 合流部における多重追従挙動に関する分析

6.1 概要

合流区間（車両錯綜が生じる区間）での運転者は「認知」「判断」「操作」という一連の動作を瞬時に行わなければならないので、一般区間に比べて運転負荷がさらに大きく、コンフリクトや交通事故が起こりやすい。そのため車両錯綜区間では、追突事故の発生や判断遅れ、合流の見送りによる渋滞等、交通安全性および効率性の点で多種多様な問題が生じやすい。したがって、合流区間での安全を評価し、効率的に改善できる方法を開発することが重要である。

合流区間では同一車線上の前方車両の挙動だけではなく、隣接する車両の挙動を認知した上で、安全のために適切な行動を決める必要がある。合流区間内で一番重要な動きは、横の動き(e.g., merging, giving way and cutting in across the stream of traffic)と縦の動き(e.g. car following behaviour along the stream of traffic)であり、これら動作を同時に行う必要があるため、合流区間では種々の交通問題が生じやすいと考えられる。よって、当該区間における車両挙動ならびに車両間の相互作用を詳細に分析・把握することは重要であり、複雑な挙動を総合的に記述する交通流モデル（交通シミュレーション）の構築は必要不可欠である。また、合流区間に適用可能な対策として、道路構造の変更による交通流の分離¹⁾や案内標識・路面表示等のハード面による改良、事前の「情報提供」「危険の警告」「運転補助」等の先端的な ITS 技術の利用によるソフト面での改良^{2),3)}がある。そうした政策の効果を定量的に評価する方法としても、交通シミュレーションが必要である。

交通シミュレーションは、これまでの評価ツールと違って交通状態の変化を動的に分析することが出来るため、きめ細かな政策評価を行うことが可能である。また結果を視覚的に表現することが出来るため、評価の結果を誰にでも分かりやすく伝えることが出来、住民参加型の交通計画等への活用も広がっている。また、一般的に、一台一台の車両挙動を記述することで交通の流れを表現するミクロ交通シミュレーションモデルは、様々な交通管理・道路運用施策に対する反応を分析するために適用されてきた。そのように非常に有用な交通シミュレーションではあるが、これまでは詳細な車両挙動を記述した交通データセットの取得が技術的に困難であったため、ミクロな交通

指標での再現性の検証は少なく，特に複雑な挙動が予想される合流部では行われていない．近年，情報処理技術が進展し，ビデオ画像から車両走行軌跡データを抽出することは可能となっており，その車両軌跡データを用いることで車両一台一台の複雑な挙動の把握が可能となる．詳細な交通データで交通流モデルを実用検証することが，複雑な交通現象の再現性向上に寄与すると考えられる．

そこで，本研究では第3章で提示したように，ビデオ画像データから時系列的な車両挙動を観測した車両軌跡データを抽出した．このデータを利用して，合流区間のミクロな車両の動きをモデル化する．特に，本章では第5章で分析した多重追従行動に基づいて，都市高速道路での合流区間の合流挙動に注目する．合流部で現れる車両合流挙動は，大きく2種類に分類できる．1つ目の挙動は，合流車両は自らが合流すべきギャップを選択する挙動で，2つ目はその後，選択したギャップへの流入を実現するための速度調整を行う挙動である．この合流挙動のうち，合流車両が速度調整を通じて合流する過程を記述するため，本研究では，まず合流ギャップ選択が先決されている状況を想定した上，合流挙動に対する分析を実施した．ここで，ギャップ選択挙動も，もちろん重要な挙動だが，実在的に危ない瞬間はギャップの選択以後に流入しようとするギャップを構成する車両たちと合流車両との関係から発生する．この危険な状態に対して安全に合流するため，合流車両は隣接した周辺車両と速度調整を通じて安全に合流するように挙動を取る．この挙動について詳細に把握及び解釈のできたら，合流区間で発生可能な交通コンフリクト及び事故をあらかじめ予防できるし，これによって発生する交通渋滞も対処できる．このような点から，合流挙動において，周辺車両との関係から合流車両の合流過程を解析することは重要だ．したがって，本研究では阪神高速道路守口線・環状線合流部を対象に，合流ギャップが決定した上での合流車両が周辺車両との速度調整する挙動，つまり追従合流挙動の分析を行う．その結果を踏まえ，実交通現象を的確に再現可能な，車両合流挙動モデルを構築することを本研究の目的とする．

6.2 合流車両と走行本車線（2車両）との走行挙動分析

本章では，阪神都市高速道路の本線合流部（守環合流部）での車両挙動のうち，図6.1に示したように，2つの車線が構造的に1車線になる区間で観測される合流挙動の分析を目的とする．この合流区間に注目した理由は上述の通り，守環合流部は交通流の錯綜が生じやすく，交通流の効率性や安全性が著しく低下する区間であることによる．また，当該区間は，主従の関係が

不明確な 2 つの車線が構造的に 1 つの車線に合流されるため、通行上の優先権が明確ではなく、車両相互に複雑な影響を及ぼし合うことが考えられる。以上を踏まえ、本研究ではビデオ画像から得た詳細な車両の走行軌跡データ（第 3 章を参照）を利用して、守環合流部で現れる車両合流挙動のうち、合流車両が選択したギャップに流入する挙動に焦点を合わせる。

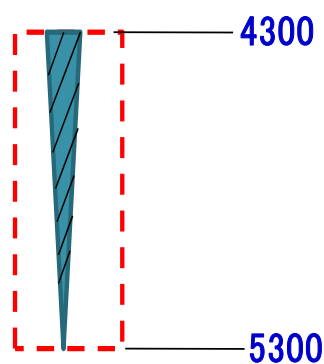


図 6.1 分析対象区間の守環合流部

6.2.1 合流の定義及び合流状態の分類

(1) 合流車両と合流の定義

本研究の対象区間である守環合流部での第 2 車線（守口線の右側車線）と第 3 車線（環状線の最左側車線）からの流入車両は、複雑な速度や位置関係を取りながら 1 車線に統合される。ここで、分析対象車両を‘合流車両’と呼び、‘守口線の第 2 車線あるいは環状線の第 3 車線を走行し、合流区間内でギャップを選択して合流する車両’と定義した。本対象区間を構成する 2 つの合流車線は、両方とも交通量が多い主道路であるから、一般の合流区間のように主道路、従道路の関係が明確ではない。そこで、本研究では便宜上、

一方の車線を「合流車線」、他方を「走行本車線」として区別する．具体的には，図 6.2 のように分析対象車両である合流車両が走行して来る車線を‘合流車線’，そして他方の車線を‘走行本車線’と定義した．ただし，2つの車線が統合される $Y=530\text{m}$ 地点から下流側も‘走行本車線’と定義した．例えば，守口線側車両を合流車両だとした場合，守口線を合流車線，環状線を走行本車線として扱う．

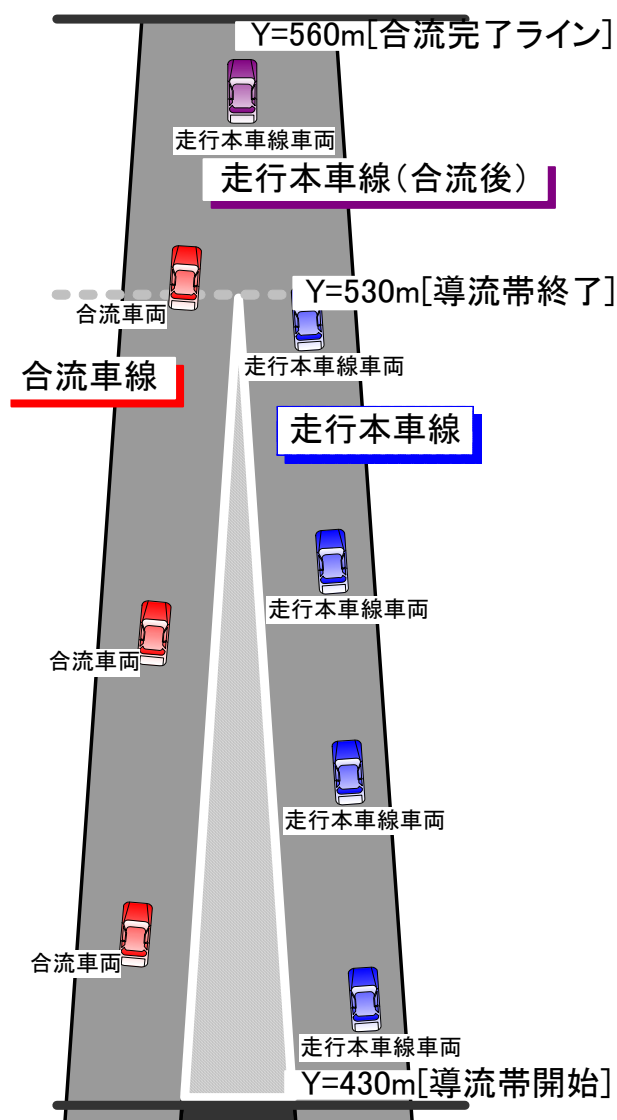


図 6.2 対象区間における合流車線と走行本車線の定義

次に，分析対象とする車両挙動を明確化する．本研究では，車両が合流ギャップを選択してから，当該ギャップに流入し合流を完了するまでの挙動を本対象合流挙動と決める．車両走行軌跡データからこの合流挙動を抽出する

ため， ‘合流完了’を明確にする．一般的に ‘合流完了’は構造的に 1 つに統合される地点，つまり本研究では導流帯がなくなる $Y=530\text{m}$ で車両の合流が完了すると考えることができる．しかし，本研究では走行本車線からの交通量が少なく合流ギャップを構成する 2 車両が合流車両の近傍に存在しない場合や，合流車両の当該ギャップを構成する前・後の車両がひたすら合流車線からの流入車両のみである状況などの発生が考えられる．したがって，本研究では図 6.3 に示したように，合流車線上を走行する合流車両の前方又は後方で走行本車線からの流入車両が y 方向に 30m 以下， x 方向に 2m 以下に，初めて近くなった時点を ‘合流完了時点’ と定義し，また，このような状況を ‘合流’ と定義した．

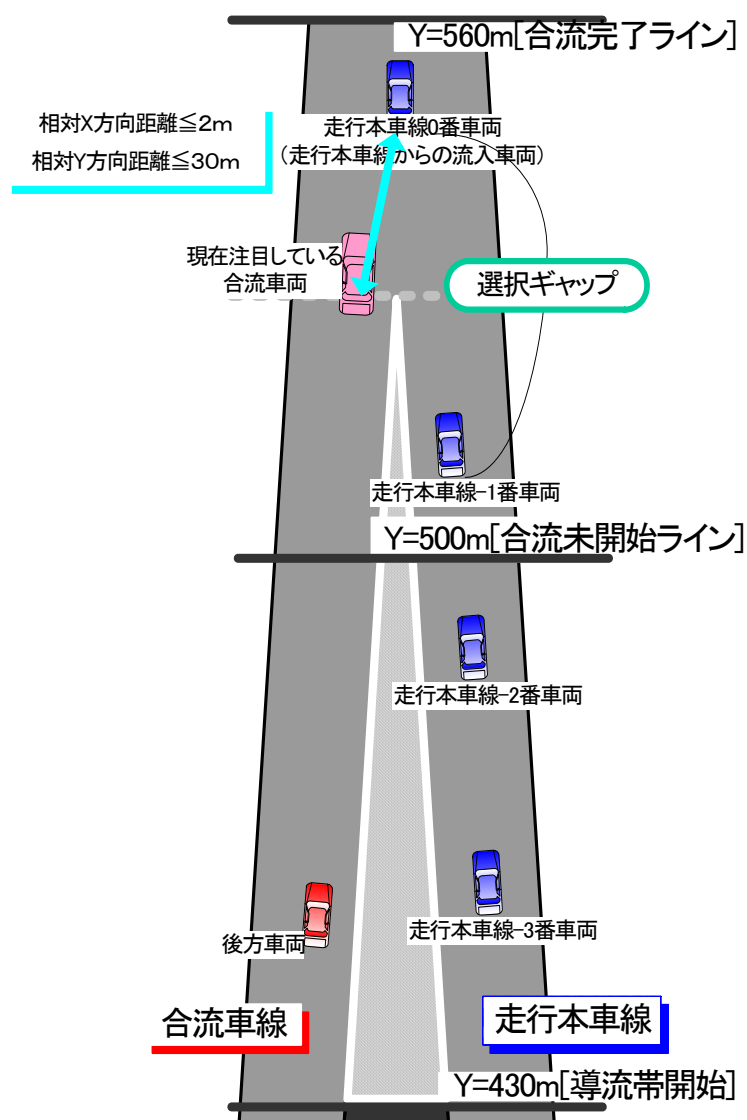


図 6.3 合流完了の定義

ここで、この状況を満足しなかった車両は分析対象から除いた。合流完了時点の条件で挙げた Y 方向に 30m という状況は、速度 20m/s(72km/h)で 1.5 秒以内の車尾間隔(time-headway)で追従する 2 台の車両を意味しており、X 方向の 2m というのは 2 台の車両が普通は並走できない距離である。すなわち、この距離の中に 2 台の車両が同時に存在したら、この 2 台は同じ車線上を追従して走行する追従車両だと判断できるのである。

(2) 合流状況の分類

対象区間の守口線と環状線はそれぞれ交通流の特性（交通密度、平均速度の差など）が違うから、注目する合流車両がどちらの合流車線（守口線の第 2 車線、環状線の第 3 車線）を走行して合流するかによって、合流挙動が変わると考えられる。そこで、図 6.4 に示すように、守口線側車両が合流車両であり、守口線が合流車線となって環状線（走行本車線）の車両間のギャップを選択する場合を‘守口線合流車両’、反対に環状線側の車両が合流車両で、環状線が合流車線となって守口線（走行本車線）の車両間のギャップを選択する場合を‘環状線合流車両’と定義した。

その上で、第 3 章で詳説した 2005 年 8 月 30 日 8:49～9:04 に観測された 15 分間走行軌跡データを用い、分析対象となる 363 台の合流車両を抽出した。表 6.1 に合流状況別の車両台数を示す。これより、‘守口線合流車両’の台数は 202 台、そして‘環状線合流車両’の台数は 161 台となり、‘守口線合流車両’に比べて‘環状線合流車両’の台数が少ないことがわかった。これは表 6.2 に示すように、各車線の車両データ数の比較から、環状線の交通量と守口線の交通量が違うことに起因している。すなわち、合流後に第 2 車線を走行している車両の内、守口線から流入してきた車両台数が、環状線の第 3 車線から流入してきた車両台数に対し約 1.42 倍存在し、守口線からの流入車両間のギャップに環状線合流車両が合流する場合が多いと判断できる。これより、守口線からの合流車両は環状線で走行する合流車両より一般的に優位（合流において先行しやすい）であることを示唆する。

表 6.1 合流車線別の合流車両台数

車線別	環状線合流車両	守口線合流車両	両車線合流車両
合流車両台数	161	202	363

表 6.2 各車線車両台数

流出 (2,3車線は合流後) 流入 (2,3車線は合流前)	第1車線	第2車線	第4車線	第5車線	流入 合計
第1車線(守口線)	328	70	9	0	407
第2車線(守口線)	12	185	184	58	439
第3車線(環状線)	21	166	21	3	211
第4車線(環状線)	0	13	280	26	319
第5車線(環状線)	0	0	10	333	343
流出合計	361	434	504	420	1,719

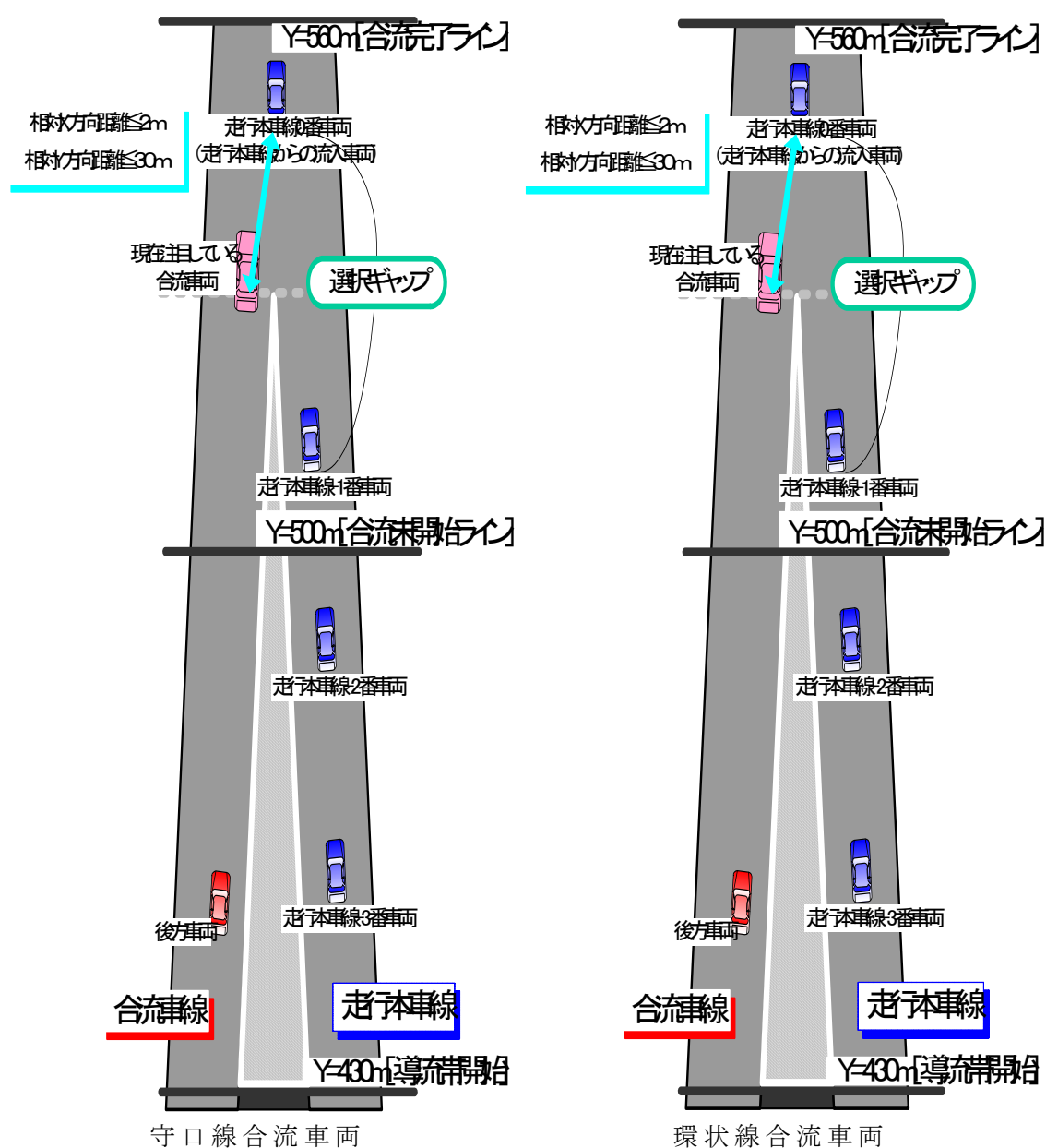
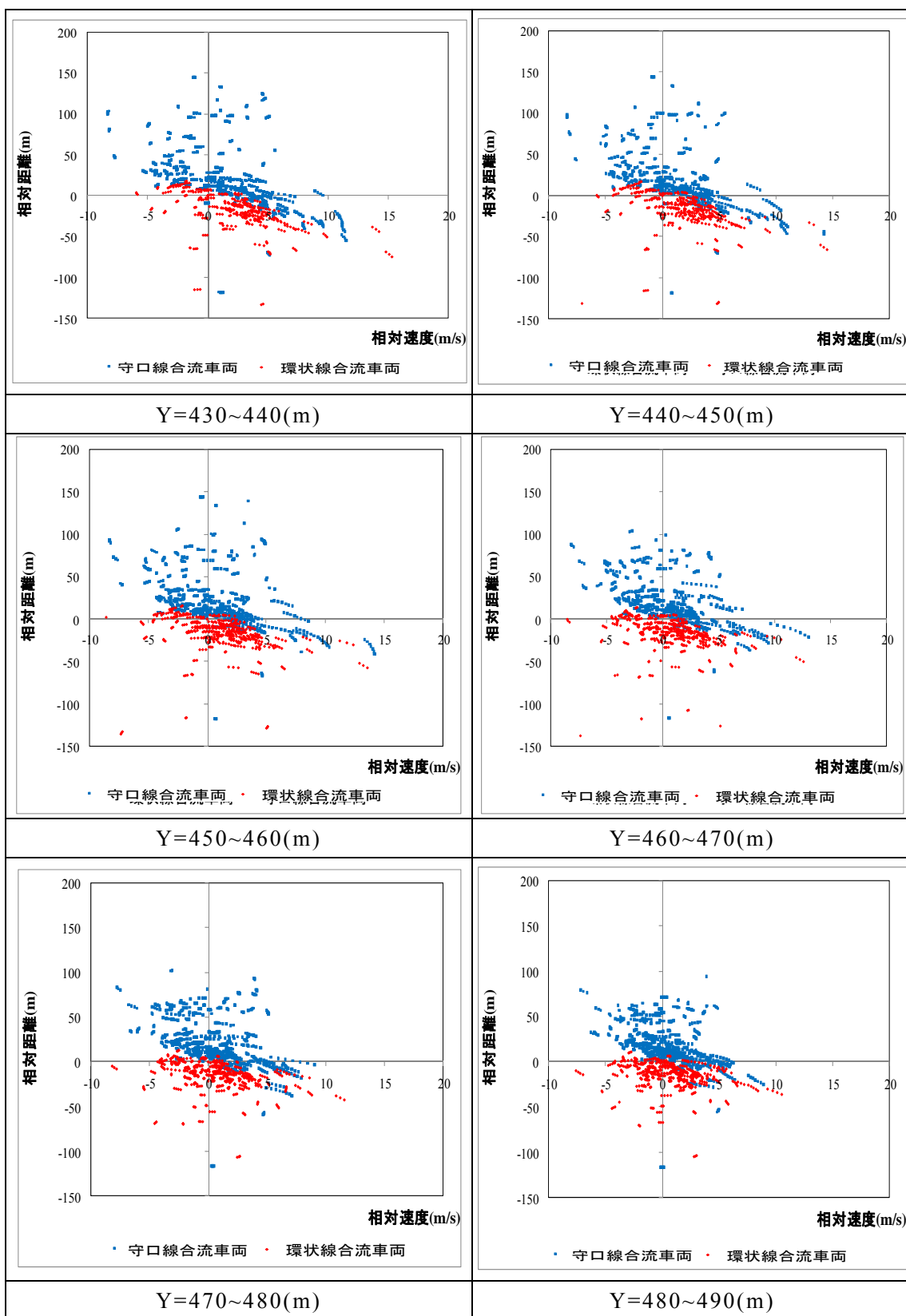
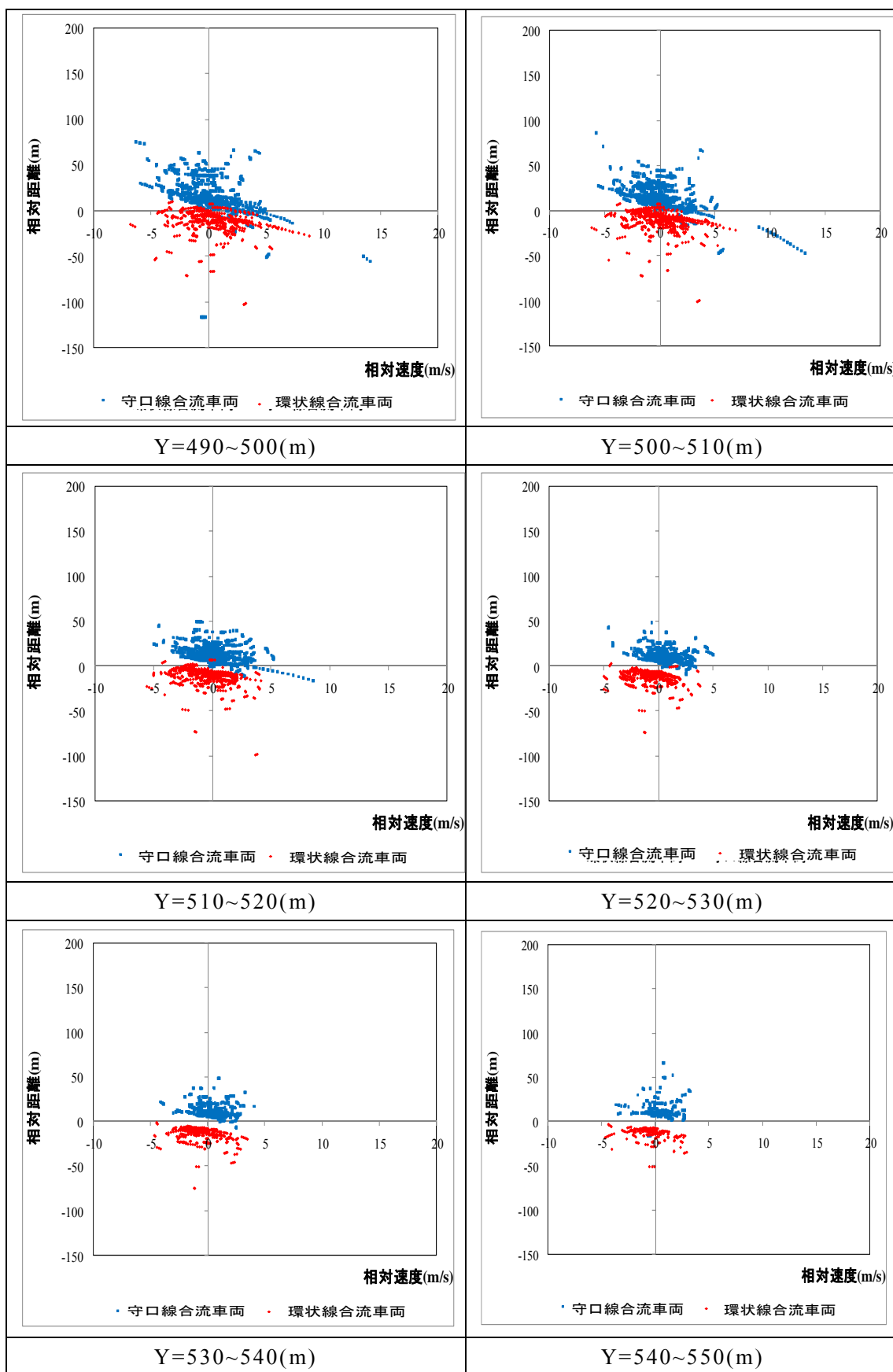


図 6.4 守口線合流車両と環状線合流車両の定義

6.2.2 合流車両の挙動分析

本研究では合流車両がギャップを選択した後，そのギャップに流入するための挙動に焦点を当てる．一般区間での追従車両は第 4,5 章で分析したように，前方車両との関係によって速度を調節して走行した．一方，合流車両の場合は走行本車線の選択したギャップに流入するため，同一合流車線だけでなく，さらに走行本車線の選択したギャップを構成する前方車両又は後方車両との関係から速度調整の挙動を行うと考えられる．したがって，合流車両と走行本車線の車両との関係を見るため，6.2.1 節で分類した守口線合流車両と環状線合流車両に対して，合流ギャップを構成する車両（前方又は後方車両）との相対速度-相対位置間の関係を分析した．ここで，合流ギャップは図 6.4 に示したように，合流完了前に合流車両が走行本車線に合流しようとする空間として，走行本車線からの車両で構成されているし，この 2 車両間の距離を合流ギャップで定義する．この時，合流ギャップを構成する走行本車線での前方及び後方車両は走行本車線から流入した車両になる．分析範囲は合流部の導流帯(zebra)が始まる $Y=430$ (合流部前 100m)から $Y=560$ （導流帯終了後 30m）までとし，0.2 秒の車両軌跡に対して 10m ごとに合流車両と走行本車線の合流ギャップを構成する車両(ギャップを構成する車両のうち，前方車両を利用されるが，前方車両がない時には，後方車両を利用)との相対位置と相対速度の関係を分析した．その結果を図 6.5 に示す．ここで，相対位置と相対速度の値は環状線の車両を基準（環状線車両の位置又は速度－守口線車両の位置又は速度）に算出した．すなわち相対位置が正(+)になる場合は，環状線側車両の Y 座標が守口線側の車両より大きいので，環状線車両が前方に位置する状況を表す．反対に，守口線側の車両が環状線の車両より前方で走行している時，相対位置は負(-)になる．相対速度も同様に，正(+)の場合は環状線車両の速度が守口線の車両より大きく，負(-)の場合は守口線の車両の方が速いことを意味する．





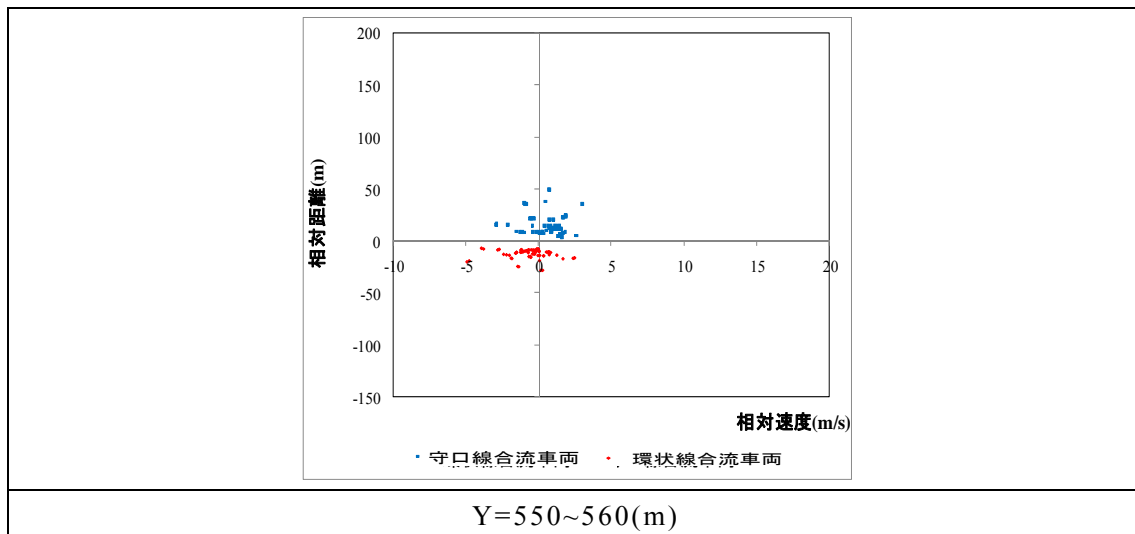


図 6.5 合流車両と走行本車線車両との相対関係図(相対位置-相対速度)

合流車両と合流ギャップを構成する前方車両との相対速度と相対位置間の関係を表す図 6.5 中、それぞれのプロットが表す状況を各象限別に整理する。

・第 1 象限：

- 1) 守口線合流車両： 同一車線（守口線）側の車両が走行本車線（環状線）側の車両より後方（上流側）に位置し、速度も相対的に小さい状況
- 2) 環状線合流車両： 同一車線（環状線）側の車両が走行本車線（守口線）側の車両より前方（下流側）に位置し、速度も相対的に大きい状況

・第 2 象限：

- 1) 守口線合流車両： 同一車線（守口線）側の車両が走行本車線（環状線）側の車両より後方に位置するが、速度は相対的に大きい状況
- 2) 環状線合流車両： 同一車線（環状線）側の車両が走行本車線（守口線）側の車両より前方に位置するが、速度は相対的に小さい状況

・第 3 象限：

- 1) 守口線合流車両： 同一車線（守口線）側の車両が走行本車線（環状線）側の車両より前方に位置し、速度も相対的に大きい状況
- 2) 環状線合流車両： 同一車線（環状線）側の車両が走行本車線（守口線）側の車両より後方に位置し、速度も相対的に小さい状況

・第4象限：

- 1) 守口線合流車両： 同一車線（守口線）側の車両が走行本車線（環状線）側の車両より前方に位置するが、速度は相対的に小さい状況
- 2) 環状線合流車両： 同一車線（環状線）側の車両が走行本車線（守口線）側の車両より後方に位置するが、速度は相対的に大きい状況

合流車両と走行本車線車両の、相対速度-相対位置間の象限別の関係を模式的に表現すれば、図 6.6 のようになる。ここで、合流車両と走行本車線の合流ギャップでの前方車両間で先行する車両になることを、合流における‘優位性’（ここで、‘優位’というのは、合流車両と走行本車線の車両との速度調節をして合流する中、この車両間に先に先行する車両が速度及び位置に対して後続する車両に比べて、‘優位’にあると考えることができる）と表現する。よって、第1象限では、環状線側の車両が守口線側の車両に比べて、優位にある状況を示している。すなわち、守口線合流車両の場合、環状線側の車両が相対的に優位にあり、環状線合流車両の場合にも環状線側の車両が相対的に優位にある。

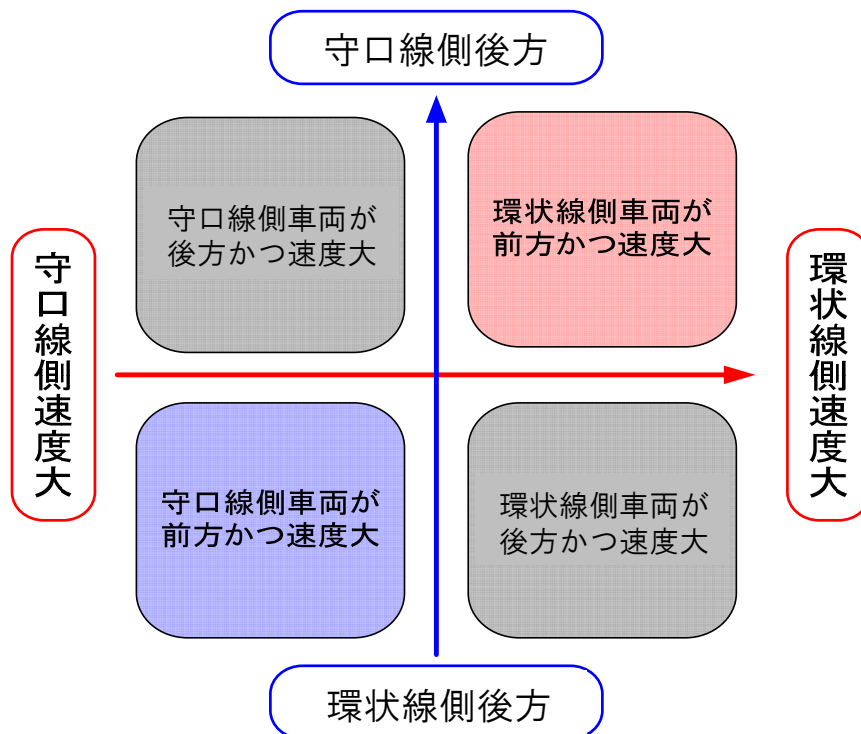


図 6.6 相対位置-相対速度図の関係

反対に、相対速度-相対位置のプロットが第3象限に存在する場合には、守口線側の合流車両が優位にあると予想できる。第1象限の状況とは反対に、守口線合流車両の場合は同一車線側の車両が相対的に優位にあり、環状線合流車両の場合には走行本車線側の車両が相対的に優位にある。また、第2象限と第4象限の場合は、合流車両と走行本車線の車両間の優位性が明確には表れない。

図6.5のY=430~440mの地点は、図6.1のY座標に対応して見れば、合流車両と選択したギャップを構成する走行本車線の流入車両間の初期状態を表すと予想できる。この地点では相対速度-相対位置のプロットの大部分が第1, 2, 4象限に存在することが分かる。まず相対速度に注目すると、プロットが第1, 4象限側にかたよって分布している。これは、導流帯(zebra)が始まるY=430~440m地点では、合流車両と走行本車線からの流入車両のなかで、環状線側の方が守口線側よりも速度の大きい車両が多いという事実を示している。すなわち、守口線を合流車線と設定した場合は走行本車線の車両の速度の方が大きく、環状線を合流車線と設定した場合は合流車線の車両の速度の方が大きいという傾向を意味する。実際に、Y=430m地点での第2車線と第3車線で走行する合流車両と走行本車線の車両の地点速度を比べた結果、環状線側の車両の平均地点速度が守口線側の車両に比べて約15km/h大きいことが明らかとなっている。一方、相対位置に注目すると、プロットが1, 2, 4象限に分布していて、相対位置は正(+), 負(-)のどちらの値もとる結果となった。これは、相対位置に関しては、合流車両と走行本車線からの流入車両との合流において、優位性を明示することができない状況を意味する。以上より、大部分の合流車両と走行本車線の車との関係が、相対速度に関しては、環状線の車両の方が守口線の車両よりも大きいが、相対位置に関しては、守口線合流車両と環状線合流車両のどちらも前方に位置する可能性を持っていることが示唆される。このような傾向は、図6.5よりY=430m~490m地点で観測される。つまり、導流帯(zebra)が始まるY=430からY=490mまでは、合流車両と走行本車線の車両間の合流における優位性が不明確な車両が多数存在すると判断できる。Y=490m地点までは、合流車両が守口線の車両の場合、合流後に環状線（走行本車線）の車両に対して先行するのか後続するのかが未確定の合流車両が存在すると言える。

Y=500m地点以後は、図6.5のように各合流車両に対するプロットが相対位置に関して、上下に分離して分布している。このような傾向はY=520m地点以降でより明確に現れる。相対位置の観点からは、環状線合流車両に関しては、相対距離が全て負、反対に、守口線合流車両の場合は全て正の関係を持つことを分かる。これは、Y=490m地点になれば、合流車両は走行本車線か

ら流入した車両との合流時の優位性をほぼ決定して走行するということを意味する。すなわち、合流時のどの車線の車両が先に合流するのかわからないに
関する合流意思決定がもうなされたということが予想できる。

また、 $Y=490\text{m}$ 以後では、相対速度の差が小さくなると同時に、徐々に環
状線合流車両のプロットは第 3 象限に、守口線合流車両は第 1 象限に集中し
て分布する傾向がある。特に、先に示した通り、合流完了地点と判断できる
 $Y=550\sim 560\text{m}$ 地点では大部分の環状線合流車両のプロットは守口線車両が
合流の優位性を持つ第 3 象限に集中して分布しており、反対に、大部分の守
口線合流車両のプロットは第 1 象限にあり、環状線車両が合流の優位性を持
つ傾向があることが分かる。すなわち、大部分の合流車両は走行本車線
の車両の後方で合流するということが分かる。しかし、この地点でも一部第 2,
4 象限に存在するプロットもあり、合流完了地点である $Y=560\text{m}$ 地点におい
ても未だ、合流車両間の優位性が明確ではないプロットも存在している。

図 6.5 で示した合流車両と走行本車線からの流入車両との相対速度-相対位
置の関係を時間の推移 ($Y=430\sim 560\text{m}$ 地点) によって、図 6.7~6.8 のように
分析した。ここで、それぞれ合流車両と走行本車線からの流入車との相対位
置-相対速度間の相対関係は、概して反時計回りのスパイラルの曲線を描くこ
とが分かる。このような結果から、守口線合流車両は走行本車線から流入し
た車両との相対速度と相対距離に応じてギャップを選択し、そのギャップで
の合流を実施しており、同様に環状線合流車両の場合も、合流時に合流車線
上の前方車両のみならず、走行本車線である守口線の車両との相対速度と相
対距離を意識して走行し、合流を実施しているということが予想できる。す
なわち、合流車両は合流部に近づきながら安全に合流するため、走行本車線
から流入した車両との相対距離、相対速度を意識しながら合流していると考え
られる。合流車両のこのような特性は、合流挙動分析を行う際に、合流車
両が走行本車線の車両をお互いに意識して走行する挙動、すなわち追従しな
がら合流する点を考慮して合流挙動を分析する必要性を示唆している。

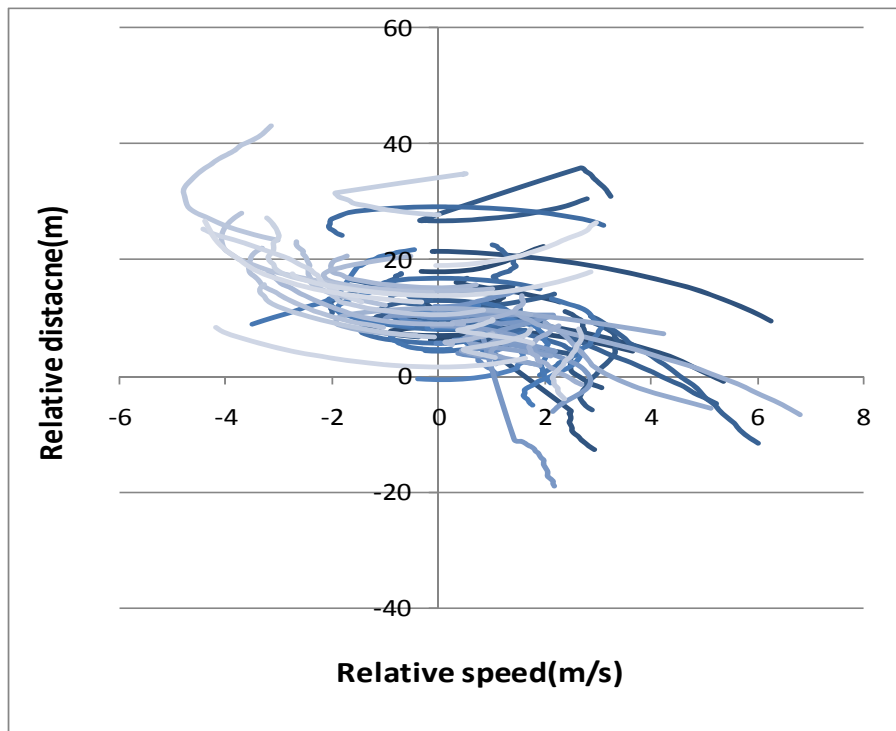


図 6.7 守口線合流車両の時間推移図

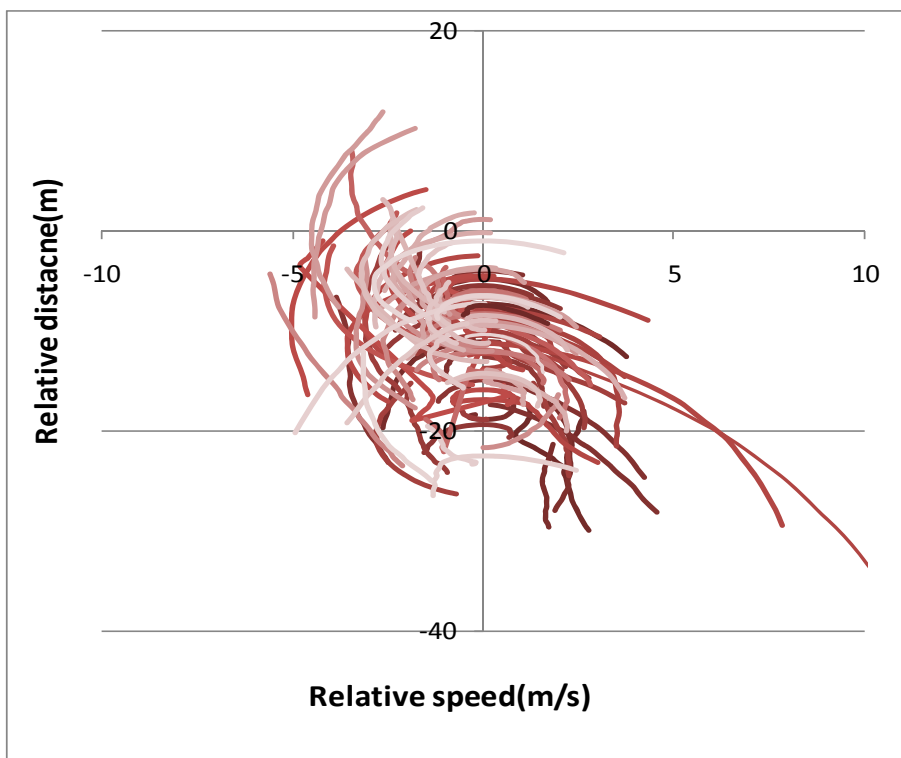


図 6.8 環状線合流車両の時間推移図

6.3 合流車両の合流追従挙動の分析

6.3.1 分析の概要

6.2 節で記述した通り，本対象合流区間を走行する合流車両（守口線合流車両，環状線合流車両）と走行本車線の車両に対して相対位置-相対速度間の関係を分析した結果，反時計回りのスパイラル曲線を描きながら分布することが分かった．これは，合流車両が安全に合流するため，走行本車線から流入した車両の行動を意識して合流するということを意味する．すなわち，合流車両は選択したギャップで合流する時，走行本車線から流入した車両との‘速度調整’を通じて合流することを意味する．このような結果に基づいて，さらに合流車両の合流挙動過程を詳しく表現するために，合流車線の車両だけではなく，走行本車線の車両を考慮した合流車両の追従行動を分析する．具体的には，合流車両が同一車線だけでなく，走行本車線の車両の行動に応じて合流する過程を説明するため，合流車両に対する多重追従行動 (Multi-anticipative car following behaviour) の概念を適用する．多重追従行動の概念は第 5 章で提示したように，追従車両が同じ道路を走行する前方車両に対して安全な走行をするため図 6.9 の (a) のように，複数の前方車両の行動に応じて追従行動を決定するという概念である．このような多重追従挙動の概念を合流区間における車両挙動に適用するため，本研究では図 6.9 の (b) のように‘合流車両は同一車線（合流車線）の前方車両だけではなく，走行本車線（横の車線）から流入した車両のうち，合流するために選択したギャップを構成する車両(前方や後方車両)すべてに応じて追従する.’と仮定した．本研究では，このような合流時における追従挙動を‘合流車両の多重追従合流挙動’と名付けた．この合流車両に多重追従概念を適用した理由に対して，上で説明した仮説を整理すれば，下のようになる．

- 1) 合流車両が同一車線の前方車両だけではなく，選択したギャップを構成する横の走行本車線の車両の行動にも応じて行動を決める．
- 2) 合流車両は選択したギャップを構成する走行本車線の車両との関係から，選択したギャップで合流する時，合流挙動と前方車両と走行本車線の車両への追従挙動という 2 つの行動によって走行する．

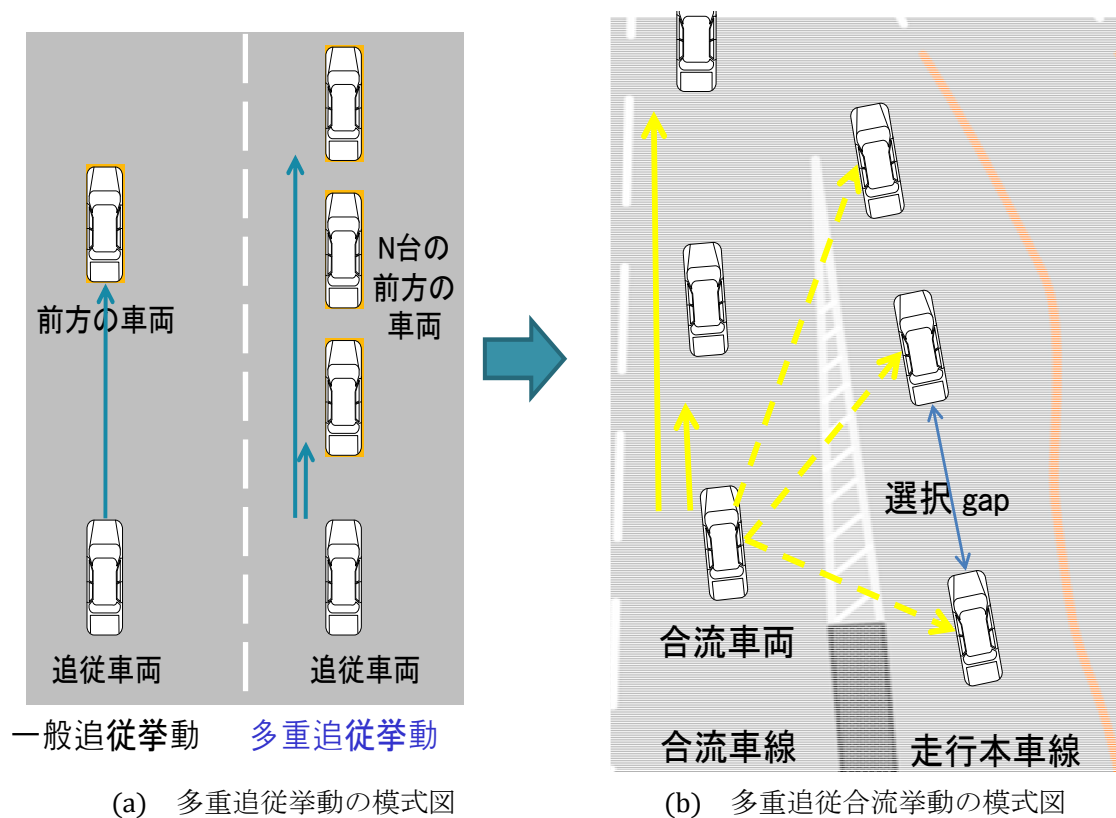


図 6.9 多重追従挙動と多重追従合流挙動の模式図

分析対象車両は、6.2.1 項で分類した守口線合流車両と環状線合流車両とし、仮定した多重追従合流挙動を分析する。ここで、合流する時、速度調整を通じて合流車両が追従する車両としては、図 6.9 の(b)のように最大で 5 台の車両からの影響を考慮する。‘5 台の車両’とは、合流車両を基準に、最大で同一車線の 2 台の前方車両と走行本車線で選択ギャップを構成する車両 2 台と、さらに 1 台前方車両を意味する。つまり、本対象区間の合流車両は選択したギャップに合流するために速度を調整する時、同一車線での 2 台の前方車両だけではなく、走行本車線の選択したギャップを構成する 2 台の前方と後方車両に応じて追従すると想定する。

分析に当り、便宜上合流車両を‘M0 (Merging vehicle)’と決めて、これを基準にして合流車両の同一車線（合流車線）の 1 番目、2 番目の前方車両を‘M1’、‘M2’と呼び、また、走行本車線から流入した車両のうち、合流車両(M0)が選択したギャップを構成する前方及び後方車両をそれぞれ‘L1’、‘L0 (Lateral vehicle)’、ギャップ構成の 2 番目の前方車両を‘L2’と呼ぶこととする。この時、守口線の車両が合流車両になる場合と環状線の車両が合流車両になる場合で状況を分類して考える。

- 守口線合流車両（図 6.10(a)参照）：

守口線の前方車両である M1, M2 と環状線での選択したギャップを構成する車両 L0, L1 と 2 番目の前方車両 L2 の行動を意識して，追従しながら合流

- 環状線合流車両（図 6.10(b)参照）：

環状線の前車両である M1, M2 と守口線での選択したギャップを構成する車両 L0, L1 と 2 番目の前方車両 L2 の行動を意識して，追従しながら合流

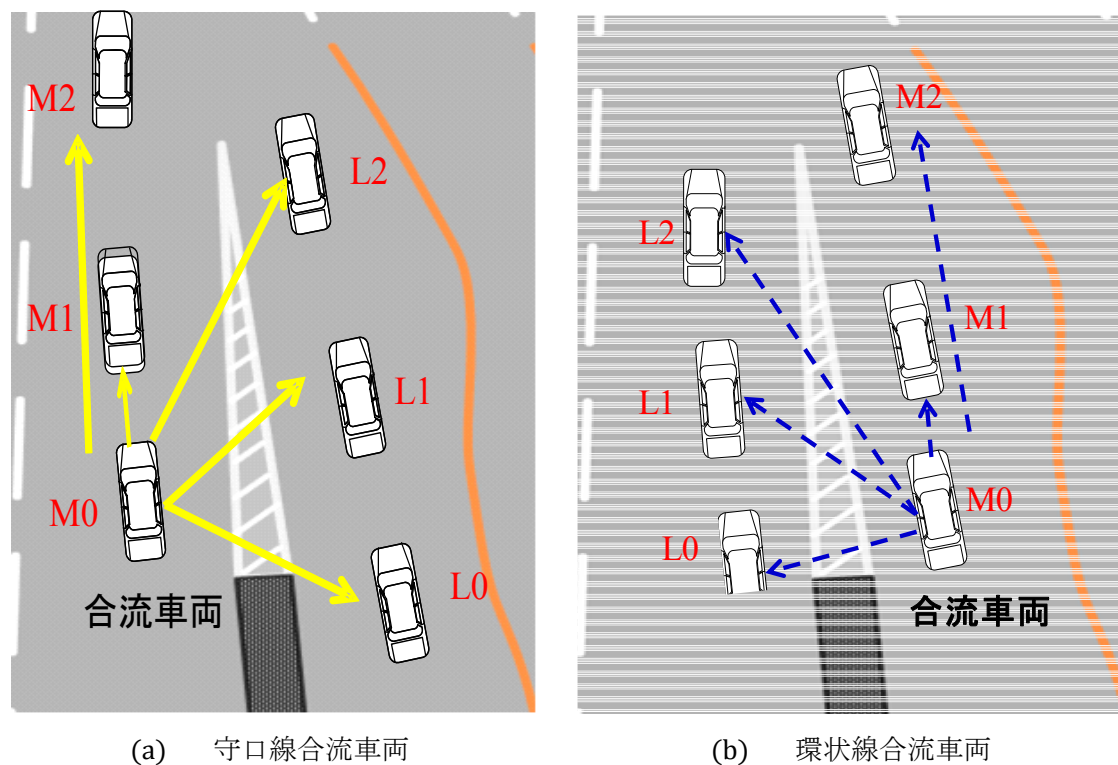


図 6.10 合流車両と周辺車両との関係

守口線合流車両と環状線合流車両の多重合流追従挙動を分析するため，本研究の第 2,4,5 章で提示した多重追従モデル(multi-anticipative car following model)のうち，Generalized Helly model を適用する．ここで注意すべきは，先述した通り，守口線合流車両と環状線合流車両を抽出する際，合流車両が走行本車線に流入した車両の中で，どのギャップ（車両）を選択するかがあらかじめ分かっているデータを利用したという点である．すなわち，合流車両が同一車線の前車両だけではなく，選択結果があらかじめ分かっている走行本車線の選択ギャップを構成する前方車両と後方車両に応じて追従する合流挙動を証明する，逆解析的な方法を取っているという点である．

6.3.2 多重追従合流車両の定義及び抽出

守口線合流車両と環状線合流車両の多重追従合流挙動を分析するためには、合流車両と追従挙動に影響を与えると考えられる車両の走行軌跡データが必要である。そこで、まず本対象合流区間での多重追従合流車両を定義する。考慮する車両としては、図 6.12 のように合流車両と同一車線の 2 台の前方車両、走行本車線の選択されたギャップを構成する前方及び後方車両、また、2 番目の前方車両の計 6 台を、1 つの多重追従合流車両セットとして構成した。多重追従状態の定義は本研究の第 5 章での定義、同一車線を走行する前方車両に対して連続的に走行する車両で、前方車両からの **time-headway**（車尾時間）が 3 秒以内、を援用し、‘連続的に走行する同一車線及び走行本車線（横の車線）での前方車両と後方車両との **time-headway** がすべて 3 秒以内である車両’と定義した。よって、多重追従合流車両セットは同一車線の前方車両との車尾時間が 3 秒以内で、走行本車線の前方と後方車両との車尾時間もすべて 3 秒以内で走行する車両の集団として定義される。ただし、分析には多重追従合流車両セットの内、分析対象車両がギャップ選択を完了した時点から合流を完了した時点まで追従状態を維持した車両軌跡データのみを用いた。

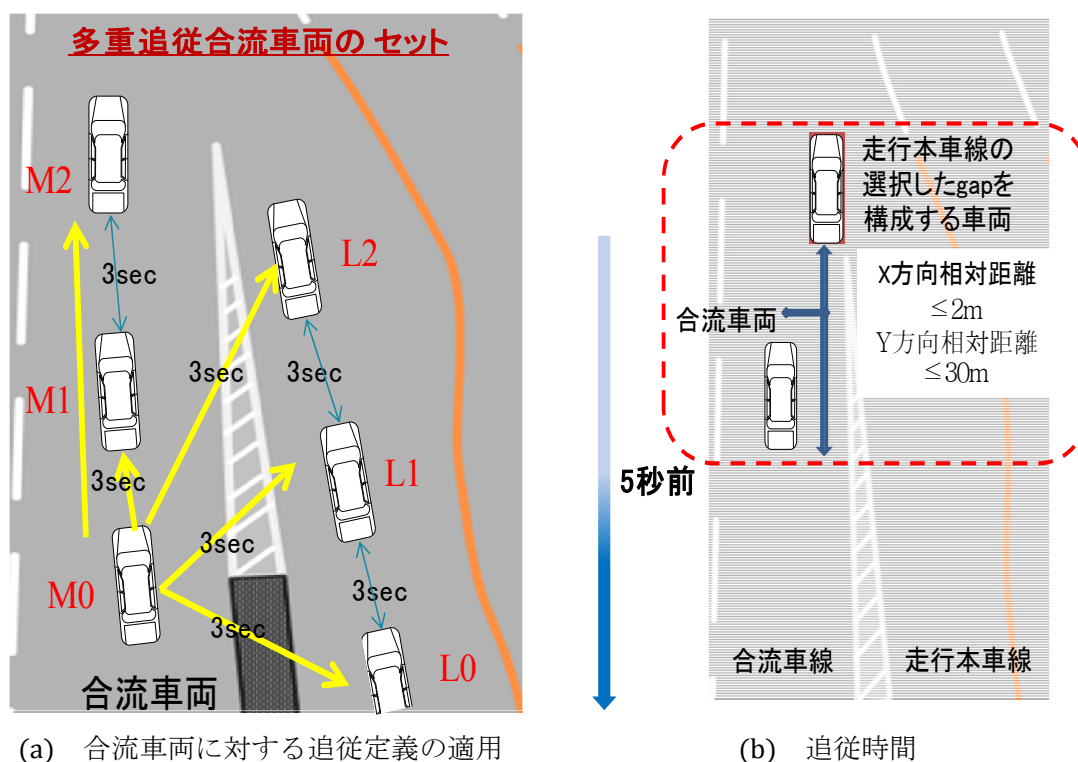
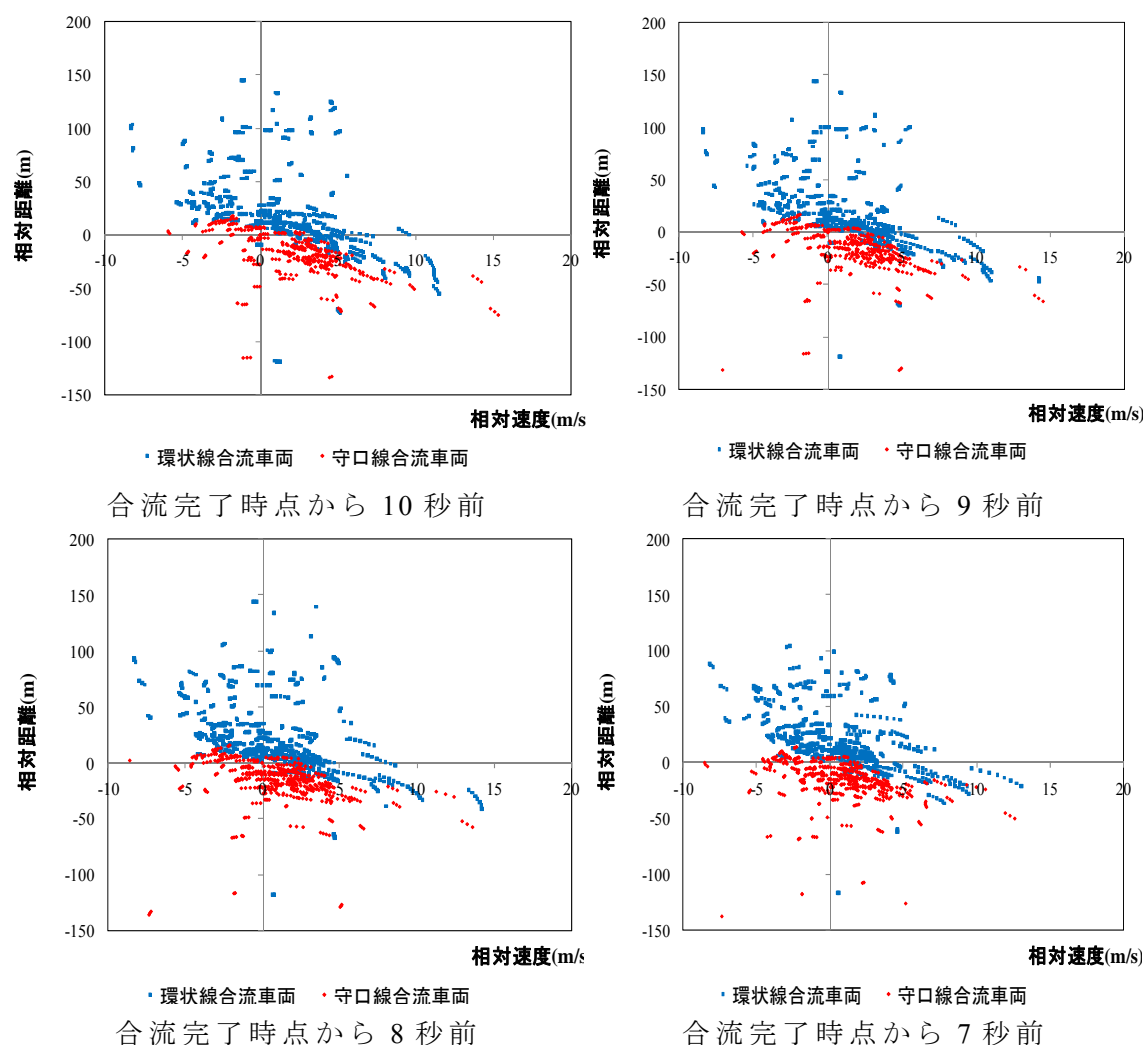


図 6.12 多重追従合流車両の定義と追従時間

ギャップ選択完了時点に関して、柳原らは、合流を完了する 5 秒前時点で

合流ギャップ選択を完了している可能性が高いことを指摘している．このことを裏付けるため，本研究では合流完了時点から 10 秒前のデータを利用して，合流完了地点での合流車両（6.1 項で示した守口合流車両は 202 台，環状線合流車両は 161 台を利用）と選択したギャップを構成する前方や後方車両との相対速度-相対距離の関係を分析した．分析の結果，図 6.13 のように合流完了時点の約 5 秒以前から，合流車両の相対速度と相対距離に対するプロットが上下で分けられて，きれいに分布していることが分かる．特に，相対距離に注目すると，合流完了 5 秒前からは大部分の守口線合流車両と環状線合流車両の相対距離の符号が変わらない結果となっている．このことから，合流車両が合流完了の 5 秒前にあらかじめギャップを選択しており，走行本車線の選択したギャップでの合流の意思決定が既に完了していると考えられる．また，5 秒前から後は，合流車両と走行本車線の車両間の相対位置は変わらないで，速度調整のみを通じてそのまま合流するということがわかる．



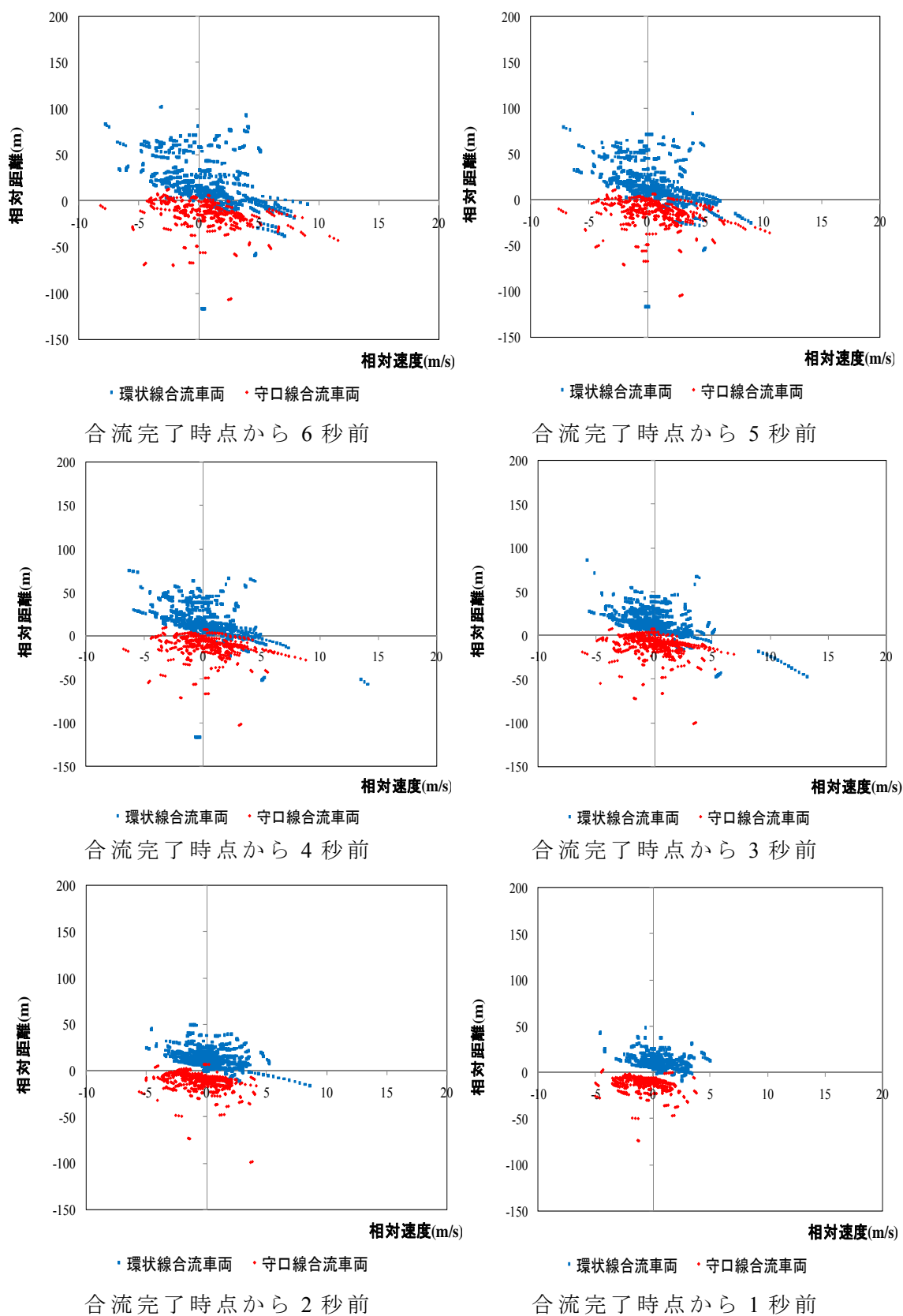


図 6.13 合流車両と走行本車線の車両との相対関係図（相対位置-相対速度）

また、合流車両と走行本車線の選択したギャップを構成する前方（または後方）車両に関して、両車両間の相対位置の状況が変わる（どちらかが追い越される）時、合流時点までの残り時間に関する頻度と累積分布を比べた。比較の結果、図 6.14 のように合流完了時点から 5 秒前に、大部分の合流車両が走行本車線の車両との相対位置の変化を終えていることが分かる。この結果は、合流完了 5 秒前に合流車両のギャップ選択の意思決定が完了して走行しているという仮定の妥当性を裏付ける。以上より、本研究では合流完了時点から 5 秒前までの走行軌跡データを利用することとした。

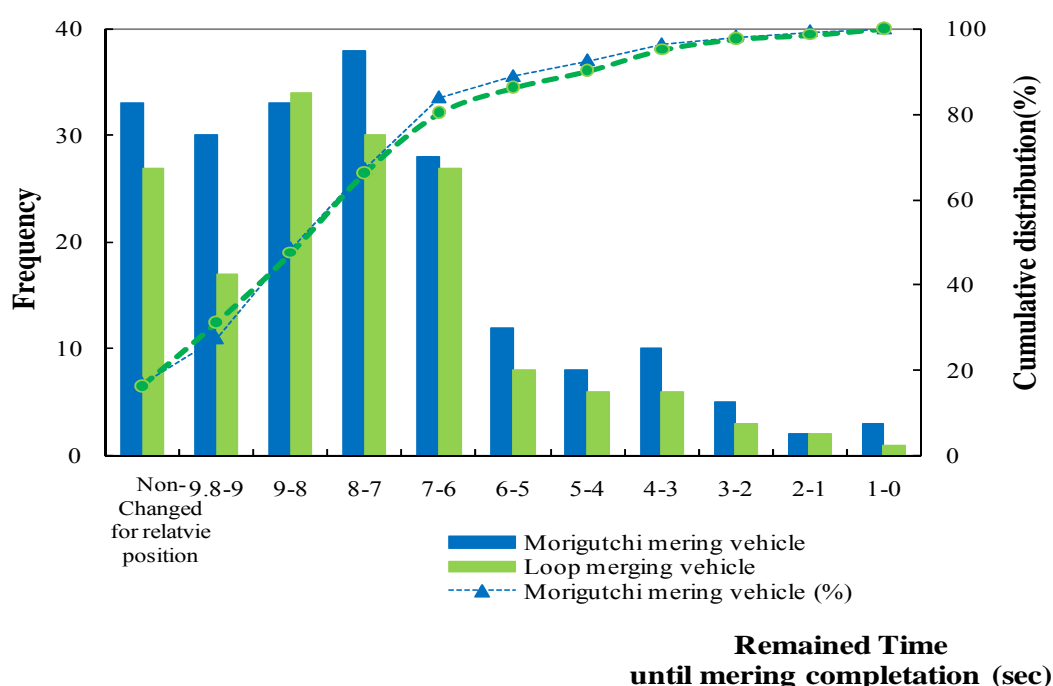


図 6.14 合流車両と走行本車線の車両との相対関係図

先に提示した多重追従合流車両の抽出条件を満足し、かつ追従時間が 5 秒以上の多重追従合流車両セットを抽出した結果、守口線合流車両の場合は 78 セット、環状線合流車両の場合は 93 セットが抽出された。この車両セット内で、車両間の車尾時間（time-headway）の分布を確認するために、合流車両と考慮する 5 台の車両間の分布を調べた。この時、各一つの合流車両セットについて 5 秒間の平均を取った値を利用し、車尾時間を h で表現した（例えば、 h_{M0M2} は車両 M0 と M2 間の車尾時間を表す）。図 6.15 は守口線合流車両と環状線合流車両に対する前方車両、後方車両間の車尾時間の平均値と分布を表している。図 6.15 を見れば、守口線合流車両で同一車線の前方車両(M1, M2) 間の車尾時間 h_{M0M1} , h_{M0M2} は各 0～3 秒, 2～6 秒ずつまで分布し、平

均値はそれぞれ 1.6 秒, 3.1 秒となった。また, 走行本車線の前方車両, 後方車両 (L0, L1, L2) 間の車尾時間 h_{MOL0} , h_{MOL1} はそれぞれ 0~3.0 秒, h_{MOL2} は 1.6~4.3 秒まで分布し, 平均値は 1.2 秒, 1.3 秒, 2.9 秒となった。同じ方法で環状線合流車両での同一車線の前方車両間の h_{MOM1} , h_{MOM2} は 3 秒まで分布しており, 平均値は 1.8 秒, 3.1 秒であった。また, 走行本車線の車両間の h_{MOL0} , h_{MOL1} は 0~3.0 秒, h_{MOL2} の場合は 1.0~3.6 秒まで分布し, 平均値は 1.1 秒, 1.1 秒, 2.5 秒であった。よって, 抽出された合流車両と連続的に走行する走行本車線の前方と後方車両は, 先に定義した多重合流追従車両の車尾時間の基準をすべて満足することがわかる。

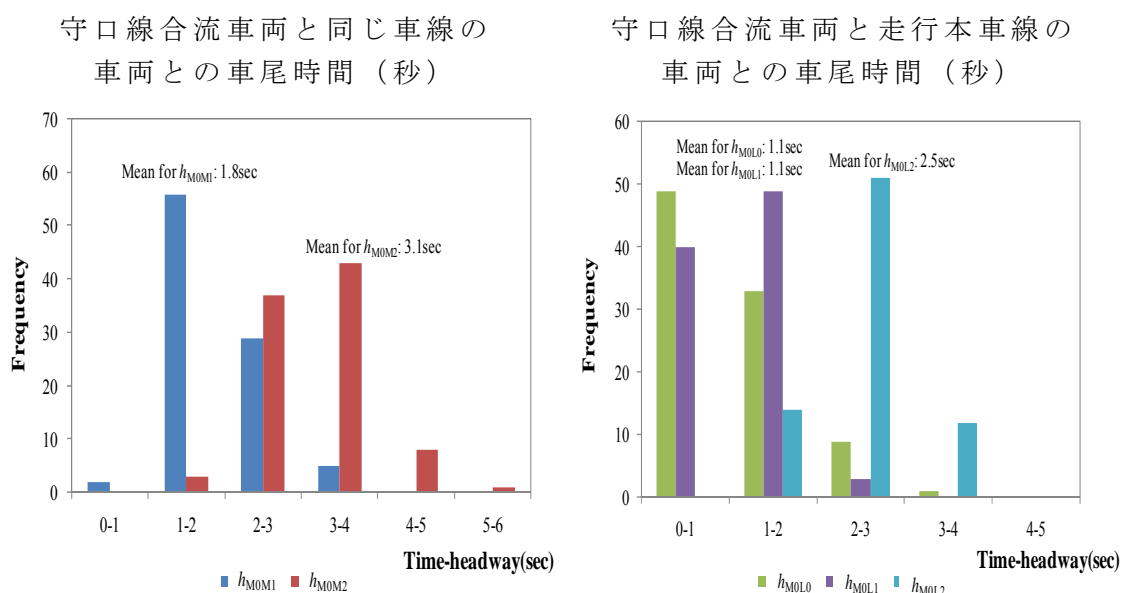
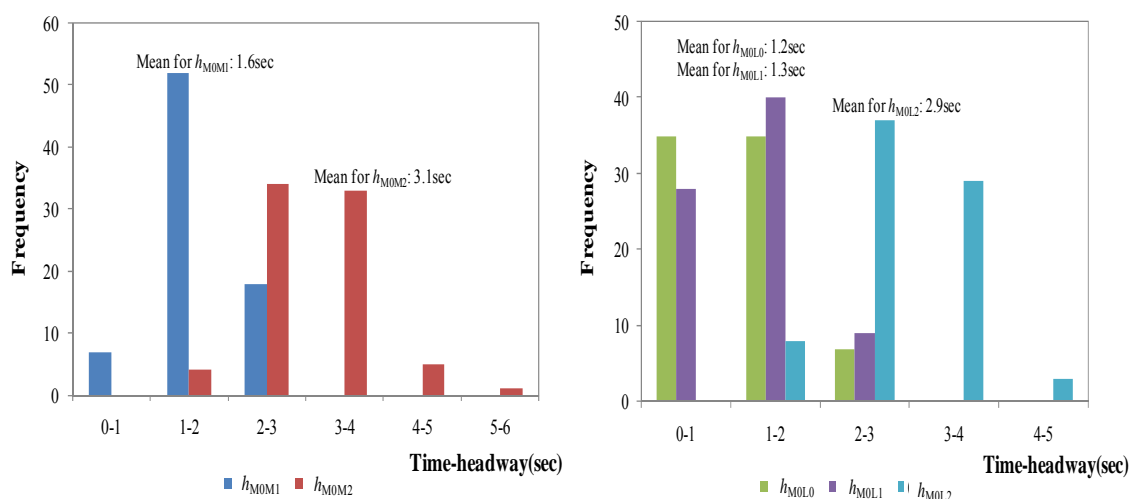


図 6.15 合流車両と周辺車両との車尾時間 (秒)

6.3.3 多重追従モデル及び推定方法

選択したギャップで合流するために，合流車両は周辺車両との速度調整を通じて合流車線の車両だけでなく，走行本車線の車両に追従する．このような合流追従挙動を分析するため，本研究では多重追従モデルのうち，Generalized Helly model (Hoogendoorn, 2006, 第 2,4,5 章参照) を適用した．Generalized Helly model は，Helly によって提示された Linear model (Helly, 1959, 第 2,4 章参照) から拡張されたモデルである．Generalized Helly model での追従車両は多重の前方車両に応じて追従するという概念を持っており，追従挙動を説明する変数としては第 5 章で示した式 5.2 のように，相対速度と相対距離が利用される．

$$a_i(t+T) = \sum_{j=1}^{m_{1,i}} \alpha_i^{(j)} \Delta v_i^{(j)}(t) + \sum_{j=1}^{m_{2,i}} \beta_i^{(j)} (\Delta x_i^{(j)}(t) - S_i^{(j)}) \quad \text{式 6.1}$$

ここで， a_i : 追従車両の加速度

$\alpha_i^{(j)}$: 前方車両 $j(j=1, \dots, m)$ に対して考慮される相対速度に関する追従車両 i の感度パラメータ

$\beta_i^{(j)}$: 前方車両 $j(j=1, \dots, m)$ と追従車両間の相対距離と希望距離(desired distance)間の差に対する追従車両の敏感パラメータ

$\Delta v_i^{(j)}$: 追従車両と前方車両間の相対速度

$\Delta x_i^{(j)}$: 前方車両を考慮した相対距離

$S_i^{(j)}$: 追従車両 i の前方車両 j に対しする希望距離

T : 反応時間 (秒)

がある．

本研究での合流区間での多重合流追従挙動は，同一車線だけでなく，横の車線（走行本車線）の車両を考慮するので，同一車線の前方車両のみを考慮する一般区間での多重追従挙動とは異なる．したがって，多重追従合流挙動を説明する説明変数として，同一車線（合流車線）の車両との相対速度や相対距離と，横の車線（走行本車線）の車両との相対速度や相対距離及び横方向の相対距離を考慮した．すなわち，図 6.16 のように縦方向（Y 方向）に対する相対速度や相対距離と，合流において絶対的に影響を及ぼす横方向（X 方向）の相対距離を考慮した．よって，本研究では本来の Generalized Helly model の関係式である式 6.1 を，横車線の車両との X 方向の相対距離を考慮して多重追従合流挙動を分析するため，式 6.2 のように再構成した．

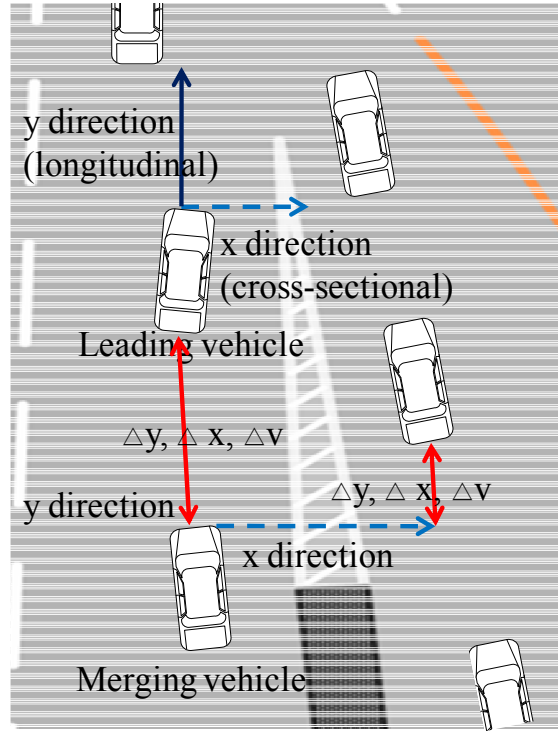


図 6.16 追従車両の進行方向を基準とした縦の方向と横の方向

$$\begin{aligned}
 a_i(t+T) = & \sum_{j=1}^{M_1} \{(\alpha_{Mi}^{(j)} \Delta v_{Mi}^{(j)}(t)) + (\beta_{Mi}^{(j)} \Delta y_{Mi}^{(j)}(t) - \beta_{Mi}^{(j)} S_{Mi}^{(j)})\} \\
 & + \sum_{j=1}^{L_2} \{(\alpha_{Li}^{(j)} \Delta v_{Li}^{(j)}(t)) + (\beta_{Li}^{(j)} \Delta y_{Li}^{(j)}(t) - \beta_{Li}^{(j)} S_{Li}^{(j)}) + (\gamma_{Li}^{(j)} \Delta x_{Li}^{(j)}(t))\}
 \end{aligned}$$

式 6.2

ここで,

- a_i : 合流追従車両の加速度
- $\alpha_{Mi}^{(j)}$: 同一車線 (合流車線, M) の前方車両 $j(j=1,2)$ に対して考慮される相対速度に関する多重追従合流車両 i の感度パラメータ
- $\alpha_{Li}^{(j)}$: 横の車線 (走行本車線, L) の前方及び後方車両 $j(j=0 \sim 3)$ に対して考慮する相対速度に関する多重追従合流車両 i の感度パラメータ
- $\beta_{Mi}^{(j)}$: 同一車線 (M) の前方車両 $j(j=1,2)$ と追従車両間の縦の方向 (Y 方向) の相対距離と希望距離 (desired distance) 間の車両に対する多重追従合流車両の感度パラメータ
- $\beta_{Li}^{(j)}$: 横の車線 (L) の前方及び後方車両 $j(j=0 \sim 3)$ と追従車両間の縦の方向 (Y 方向) の相対距離と希望距離 (desired distance) 間の車両に対する多重追従合流車の感度パラメータ

$\gamma_{Li}^{(j)}$: 横の車線(L)の前方及び後方車両 j(for j=0~3)に対する横の方向 (X 方向) の相対距離に対する多重追従合流車両 i の感度パラメータ

$\Delta v_{Mi}^{(j)}$: 合流追従車 i と同一車線(M)の前方車両 j との相対速度

$\Delta v_{Li}^{(j)}$: 合流追従車両 i と横の車線(L)の前方及び後方車両 j との相対速度

$\Delta y_{Mi}^{(j)}$: 同一車線(M)の前方車両 j との縦の方向 (Y 方向) の相対距離

$\Delta y_{Li}^{(j)}$: 横の車線(L)の前方及び後方車両 j と合流追従車両 i との縦の方向 (Y 方向) の相対距離

$s_{Mi}^{(j)}$: 追従車両 i が同一車線(M)の前方車両 j に対する希望距離

$s_{Li}^{(j)}$: 追従車両 i が横の車線(L)の前方及び後方車両 j に対する希望距離

$\Delta x_{Li}^{(j)}$: 横の車線(L)の前方及び後方車両 j に対する横の方向 (X 方向) の相対距離

T : 反応時間 (秒)

である.

ここで, 多重追従挙動の説明変数である相対速度, 相対距離の算出は, 一般的に追従車両に影響を与える車両を基準にして算出するので, 本研究でもこの方法を同様に適用して, 同一車線の前方車両と横の車線の前方及び後方車両がすべて合流車両に影響を及ぼすので, この前方及び後方車両を基準に, 相対速度と相対距離を計算した. したがって, 相対速度(距離)の場合は前方及び後方車両の速度(距離)と合流追従車両の速度(距離)の差(前方及び後方車両の速度(距離)-合流車両の速度(距離))となる.

Desired distance (希望距離)については, 第 5 章で示した Ossen and Hoogendoorn(2006, 2007)の Desired distance (希望距離)の関係式(式 5.3 参照)を用いて, 同一車線の車両に対する多重追従合流車両の希望距離を算定することは可能である. しかし, 多重追従合流挙動は同一車線の車両だけでなく横の車線である走行本車線の車両も考慮する. よって, 横の車線(走行本車線)の車両に対する縦の方向(Y 方向)だけでなく, 横の方向(X 方向)の相対距離も存在するから, 本研究には縦の方向のみを考慮した Ossen and Hoogendoorn(2006, 2007)の Desired distance の関係式は適用できない. また, 同一車線ではない横の車線の車両への希望距離に対する意味がないと判断し, 各車両に対する希望距離を一つの変数 $D(t)$ と置き換えて算定した. したがって, Generalized Helly model (式 6.1) は上で, 本研究での多重追従合流挙動を分析に必要な全要因を考慮して, 構成式を式 6.3 のように再構成した.

$$\begin{aligned}
a_i(t+T) = & \sum_{j=1}^{M_1} \{(\alpha_{Mi}^{(j)} \Delta v_{Mi}^{(j)}(t)) + (\beta_{Mi}^{(j)} \Delta y_{Mi}^{(j)}(t))\} \\
& + \sum_{j=0}^{L_2} \{(\alpha_{Li}^{(j)} \Delta v_{Li}^{(j)}(t)) + (\beta_{Li}^{(j)} \Delta y_{Li}^{(j)}(t)) + (\gamma_{Li}^{(j)} \Delta x_{Li}^{(j)}(t))\} \\
& - \left(\sum_{j=1}^{m_1} \beta_{Mi}^{(j)} S_{Mi}^{(j)} + \sum_{j=0}^{m_2} \beta_{Li}^{(j)} S_{Li}^{(j)} \right)
\end{aligned}$$

置換変数 D

式 6.3

ここで、 $D(t)$ はすべての希望距離に対する置換変数である。

$$\begin{aligned}
a_i(t+T) = & \sum_{j=1}^{M_1} \{(\alpha_{Mi}^{(j)} \Delta v_{Mi}^{(j)}(t)) + (\beta_{Mi}^{(j)} \Delta y_{Mi}^{(j)}(t))\} \\
& + \sum_{j=0}^{L_2} \{(\alpha_{Li}^{(j)} \Delta v_{Li}^{(j)}(t)) + (\beta_{Li}^{(j)} \Delta y_{Li}^{(j)}(t)) + (\gamma_{Li}^{(j)} \Delta x_{Li}^{(j)}(t))\} \\
& - \left(\sum_{j=1}^{m_1} \beta_{Mi}^{(j)} S_{Mi}^{(j)} + \sum_{j=0}^{m_2} \beta_{Li}^{(j)} S_{Li}^{(j)} \right)
\end{aligned}$$

再構成した式 6.3 を適用して、本研究の多重追従合流車両の挙動を分析する。この式で求めるパラメータは $m_1^{(j)}$, $m_2^{(j)}$ そして $\alpha_{Mi}^{(j)}$, $\alpha_{Li}^{(j)}$, $\beta_{Mi}^{(j)}$, $\beta_{Li}^{(j)}$, $\gamma_{Li}^{(j)}$, T がある。ここで、パラメータ $m_1^{(j)}$, $m_2^{(j)}$ は推定しないで値としてあらかじめ設定するが、一方にパラメータ $\alpha_{Mi}^{(j)}$, $\alpha_{Li}^{(j)}$, $\beta_{Mi}^{(j)}$, $\beta_{Li}^{(j)}$, $\gamma_{Li}^{(j)}$, T は推定するパラメータとして、モデルの決定係数が最大化する値を採用する。推定しないパラメータ $m_1^{(j)}$, $m_2^{(j)}$ は線形関係によって多重追従合流車両の加・減速を表現できるパラメータとして、 $m_1^{(j)}$ は考慮する同一車線（合流車線）の前方車両のうち、分析の際に相対速度と縦の方向（Y 方向）の相対距離を考慮する台数を意味している。パラメータ $m_2^{(j)}$ は、多重追従合流車両が横の車線（走行本車線）の前方や後方車両のうち、分析の際に相対速度、縦の方向（Y 方向）の相対距離、そして横の方向（X 方向）の相対距離を考慮する台数を表す。本研究では多重追従合流車両が追従する車両として、同一車線では 2 台、横の車線では 3 台の車両を考慮したので、パラメータ $m_1^{(j)}$, $m_2^{(j)}$ の値は $m_1=2$, $m_2=3$ となる。また、パラメータ $\alpha_{Mi}^{(j)}$, $\alpha_{Li}^{(j)}$, $\beta_{Mi}^{(j)}$, $\beta_{Li}^{(j)}$, $\gamma_{Li}^{(j)}$ を推定には、追従車両の反応時間 T を設定する必要がある。よって、多重追従合流車両の反応時間 (T) を 0.2~3 秒までの値を持つと仮定した。すなわち、 $m_1=2$, $m_2=3$ と $T=0.2\sim 3.0$ 秒に基づいて、Generalized Helly model を再構成した式 6.3 で多重追従合流挙動を分析した。分析車両である合流車両セットとしては、守口線合流車両の場合の 78 セットと環状線合流車両の 93 セットを利用して、計 15 個（パラメータ m_1 , m_2 と 15 個の反応時間の組み合わせ、e.x. (m_1, m_2, T)=(2,3,0.2), (2,3,0.4),

(2,3,2.8), (2,3,3.0)) の追従モデルに対して、最小二乗法でパラメータ $\alpha_{Mi}^{(j)}, \alpha_{Li}^{(j)}, \beta_{Mi}^{(j)}, \beta_{Li}^{(j)}, \gamma_{Li}^{(j)}$ を推定した。この時、多重追従合流挙動に対する最適モデルとして、最大決定係数を持っているモデルを選択した。

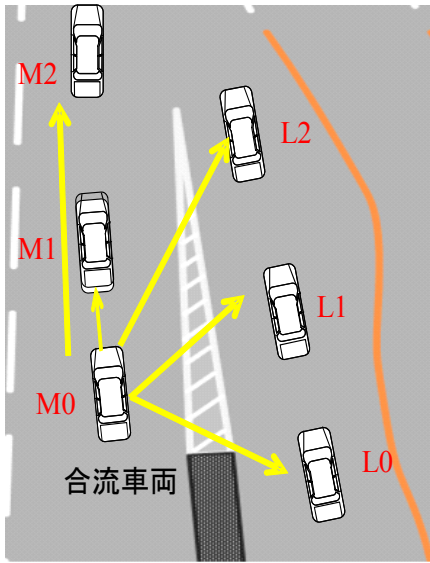
6.3.4 分析結果を利用した多重追従合流挙動の分析

(1) 多重追従合流挙動に対する説明変数の選定

多重追従合流挙動を分析するため、守口線合流車両の 78 セットと環状線合流車両の 93 セットに対して反応時間 T を 0.2~3.0 秒と設定し、最小二乗法を利用してパラメータ $\alpha_{Mi}^{(j)}, \alpha_{Li}^{(j)}, \beta_{Mi}^{(j)}, \beta_{Li}^{(j)}, \gamma_{Li}^{(j)}$ を推定した。推定したパラメータのうち最大決定係数を持つモデルを最適モデルとして、そのモデルパラメータについて考察を行う。

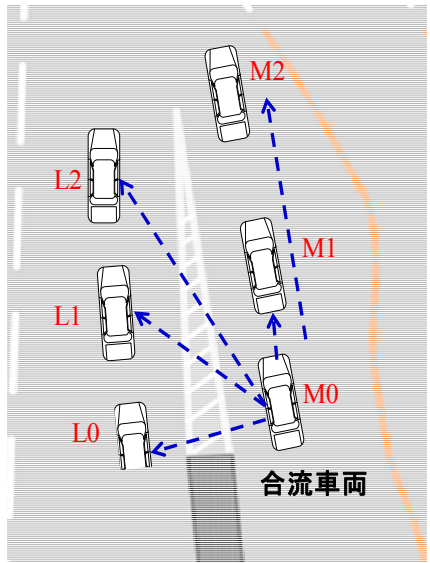
パラメータを推定する前に、多重追従合流挙動に影響力のある説明変数を選定するため、説明変数として考慮する車両との相対速度、縦方向（Y 方向）と横方向（X 方向）の相対距離に対して、合流車両の加速度との相関関係を分析した。表 6.4 に守口線合流車両と環状線合流車両に対する相関分析の結果を示す。

表 6.4 守口線合流車両と環状線合流車両に対する相関関係の結果



合流車両

守口線合流車両



合流車両

環状線合流車両

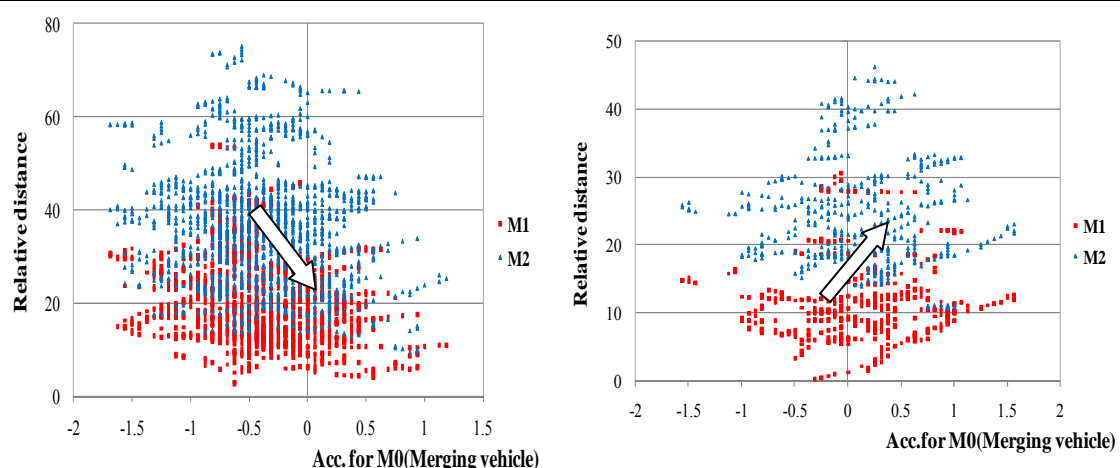
守口線合流車両													
説明変数	α_{M1}	α_{M2}	α_{L0}	α_{L1}	α_{L2}	β_{M1}	β_{M2}	β_{L0}	β_{L1}	β_{L2}	γ_{L0}	γ_{L1}	γ_{L2}
相関係数	0.529	0.579	0.17	0.5	0.396	-0.369	-0.386	0.008	-0.423	-0.076	-0.385	-0.383	-0.278
Sig	0.000	0.000	0.06	0.000	0.201	0.000	0.000	0.759	0.001	0.000	0.000	0.000	0.046

環状線合流車両													
説明変数	α_{M1}	α_{M2}	α_{L0}	α_{L1}	α_{L2}	β_{M1}	β_{M2}	β_{L0}	β_{L1}	β_{L2}	γ_{L0}	γ_{L1}	γ_{L2}
相関係数	0.907	0.78	0.591	0.784	0.496	-0.405	-0.04	0.299	-0.584	-0.366	-0.232	-0.419	-0.314
Sig	0.000	0.000	0.000	0.000	0.08	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.146	0.000	0.086

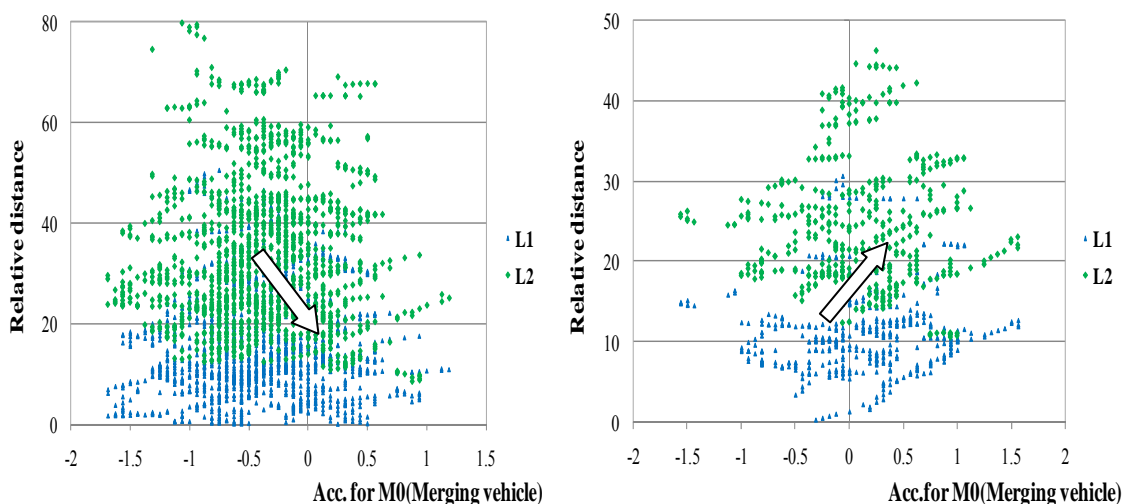
守口線合流車両の場合、選択したギャップを構成する横の車線（走行本車線）の後方車両(L0)と2番目の前方車両(L2)に対して、相対速度（ α_{L0} , α_{L2} ）と相対距離（ β_{L0} , β_{L2} ）すべて相関関係が弱く、統計的に有意でないことが明らかとなった。これは横の車線の後方車両と2番目の前方車両が守口線合流車両の多重追従において、合流車両に及ぼす影響が他の変数に比べて極めて小さいことを意味する。反して、環状線合流車両の場合、相対速度に関しては走行本車線の2番目の前方車両(α_{L2})とは相関性はあるが、その相関性が統計的に有意でない結果となった。また、Y方向の相対距離に関しては横の車線の後方車両(β_{L0})が、X方向の相対距離に対しては走行車線の後方(γ_{L0})及び2番目の前方車両(γ_{L2})が、統計的に有意な相関性を持たない結果となった。この理由として、守口線車両が合流車両の場合、走行本車線である環状線で選択したギャップを構成する後方車両は大部分の合流車両よりも後方に位置するため、他の車両よりも合流車両に及ぼす影響が小さいことが考えられる。また、走行本車線の2番目の前方車両の場合は、合流車両が選択したギャップを構成する車両がL0, L1だから、車両L2が合流車両に与える影響力が他の車両と比べて小さいことを予想できる。この結果に基づいて、合流車両に対する説明変数の中から、相関性が統計的に非有意な変数を除き、残りの説明変数のみを用いて多重追従合流挙動を分析する。

この相関分析の結果で注目すべきことは、守口線と環状線合流車両の両方において、同一車線と横の車線の縦方向及び横方向の相対距離に対する相関係数の符号が、横の車線の後方車両を除いてすべて負(-)になったという点である。この相対距離の符号が負(-)にこの影響を考察するため、道路構造上、2路線が1車線化する合流完了地点（導流帯終点、約530m）を基準にして、Y座標に沿って前方車両間の相対距離（Y方向とX方向）と合流車両の加速度の関係を分析した。図6.17はY座標値によって色分けした加速度－相対距離の散布図を現れる。この図6.17を見ると、相対距離と加速度との関係が導流帯終点より上流側では、概ね正の関係をあるけれども、それより下流側では負の関係が生じていて、その結果として全体的に負の相関があるように見える。この傾向は横の車線の車両よりも、合流車線の車両により明らかに現れている。X方向では、導流帯終点約530m以後に合流車両と走行本車線は合流して同一車線を走行するので、この地点までの相対距離（X方向）及

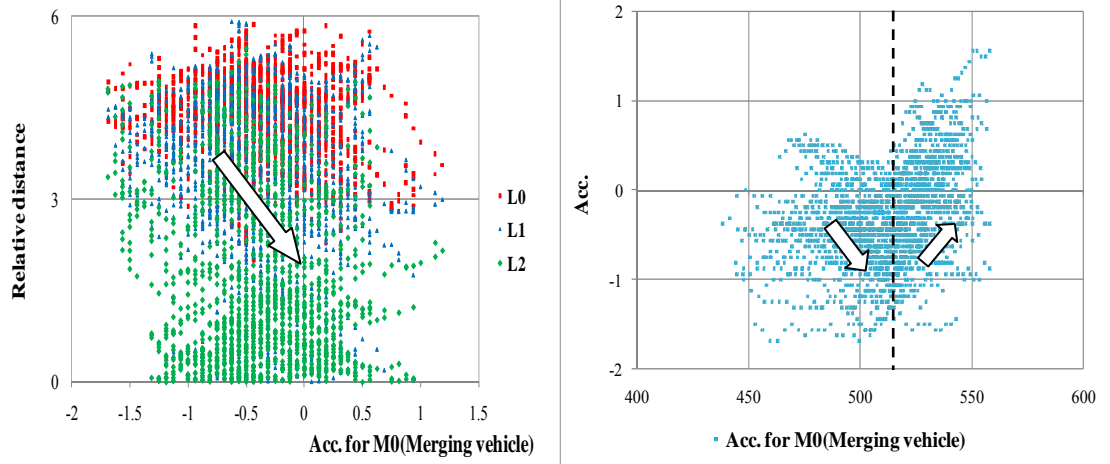
び加速度の傾向を分析する．図 6.17 の(e)見ると，大体的に減速の傾向があることをわかった．ここで，大きい相対距離を持つ場合が，比較的に大きい減速量を持つことで現われて，相対距離と加速度間の負の関係があることと見える．したがって，導流帯終点より上流側では相対距離と加速度は正の関係が，下流側では負の関係があることで，全体的に相対距離と合流車両の加速度の関係が負の相関であることをわかった．



(a) Y 座標に沿った導流帯終点約 530m (b) Y 座標に沿った導流帯終点約 530m
以前，合流車線の前車との相対距離以後，合流車線の前車との相対距離（Y 方向）



(c) Y 座標に沿った導流帯終点約 530m (d) Y 座標に沿った導流帯終点約 530m
以前走行本車線の前車及び後車 以後走行本車線の前車及び後車との相対距離（Y 方向）



(e) Y 座標に沿った導流帯終点約 530m

以前走行本車線の前方及び後方車両 (f) Y 座標に沿った合流車両の加速度
との相対距離 (X 方向)

図 6.17 Y 座標に沿った相対距離，合流車両の加速度

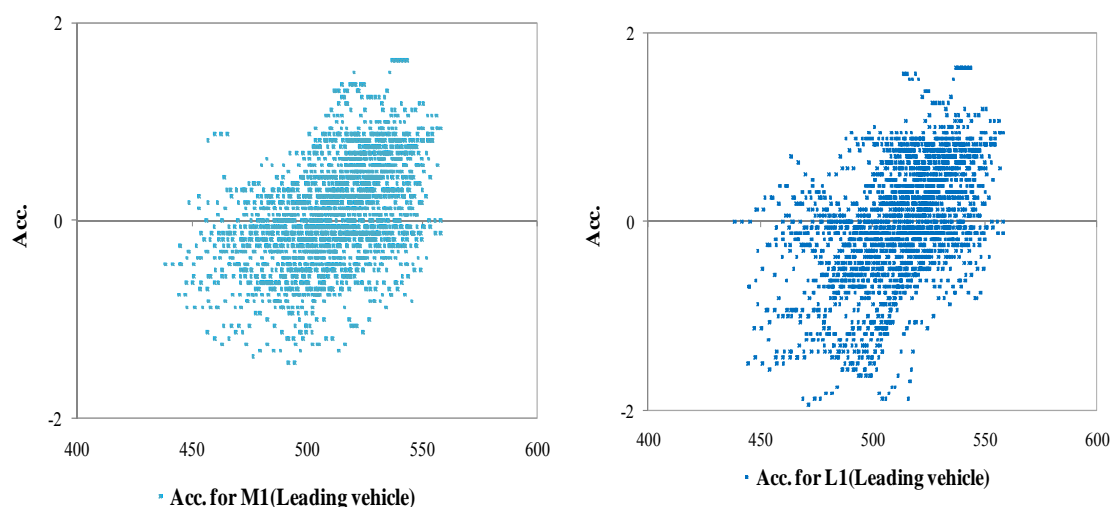
このような結果が表れる理由として，下の 2 つの要因が影響を及ぼしていると仮定する．

- 仮定要因：①同一車線と横の車線の前方車両 M_1 ， L_1 の加・減速
(大きい相対速度)
②進行方向の違い

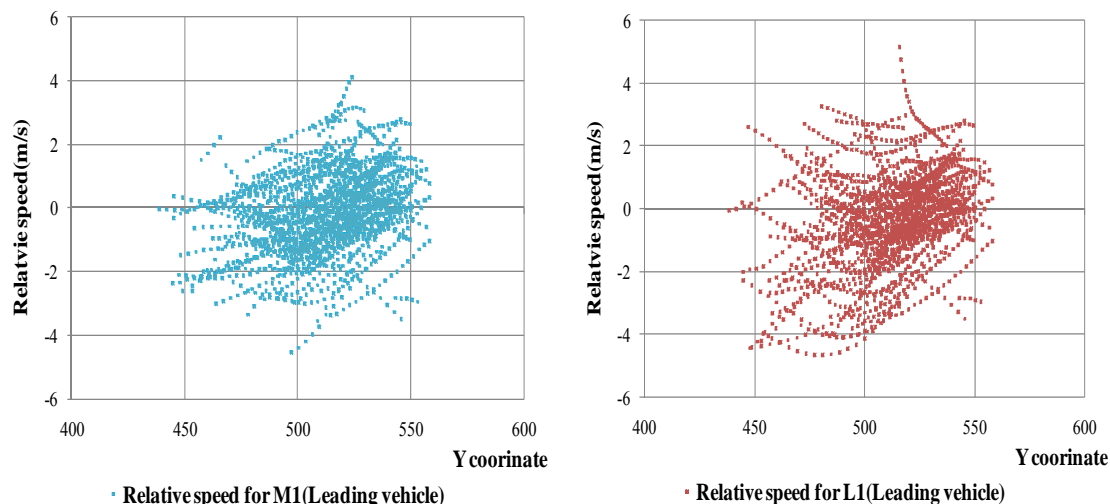
つまり，他の車両に比べて合流車両に直接的に影響を及ぼす前方車両 M_1 ， L_1 の加・減速に対して，合流車両もこの車両との同じ傾向を持って加・減速するということである．また，合流区間での合流車両は一般区間の車両とは違う進行方向を持っている．一般区間の車両は Y 方向が進行方向になるが，合流車両は Y 方向だけではなく X 方向にも動くので，両方向の動きを合わせた方向が進行方向となる．よって，多重追従合流モデルでの相対速度，相対距離による説明変数だけではなく，この要因も合流挙動に影響を及ぼす可能性がある」と仮定した．

仮定した 2 つの要因が実際に影響を及ぼすかどうかを検討するため，まず，前方車両 M_1 ， L_1 に対して Y 座標に沿った加速度 (相対速度) の傾向を分析した．図 6.18 を見ると，車両 M_1 ， L_1 の減・加速は皆図 6.17 の (d) で示した合流車両と加・減速傾向が似ていることが分かった．合流完了地点 (導流帯終点，約 530m) に近づくほど，車両 M_1 ， L_1 はますます加速する傾向があることで現れた．また，この時の車両 M_1 ， L_1 と合流車両との相対速度を比べると，

合流車両の加速が現れる部分では相対速度も大部分正の値を持つことが見える．図 6.17 と図 6.18 を一緒に見れば，車両 M_1 ， L_1 との相対距離は導流帯終点に近づくほど減少するが，この時，前方車両と後方車両は皆加速すると正の相対速度が現れることがわかった．これは，導流帯終点に近くなるほど前方車両との相対距離は比較的短いが，前方車両 M_1 ， L_1 が加速して，また前方車両の速度が合流車両より速いから，短い相対距離にもかかわらず，合流車両は加速することが予想できる．



(a) 合流車線の前方車両の加速度 (b) 走行本車線の前方車両の加速度



(c) 合流車線の 1 番目の前方車両と合流車両との相対速度 (d) 走行本車線の 1 番目の前方車両と合流車両との相対速度

図 6.18 合流車両と走行本車線の前方車両の加速度，合流車両との相対速度

合流車両の加・減速に影響を及ぼす 2 番目の要因として，先に示したように

‘他の進行方向’を仮定した．合流車両の進行方向は図 6.19 に示したように，合流完了時点に近づくほど，Y 方向だけでなく X 方向にも進行している．このことから，Y 方向の相対距離が小さくても，周辺の前方車両が加速する場合の合流車両は，X 方向の距離を勘案して加速する傾向があると予想できる．

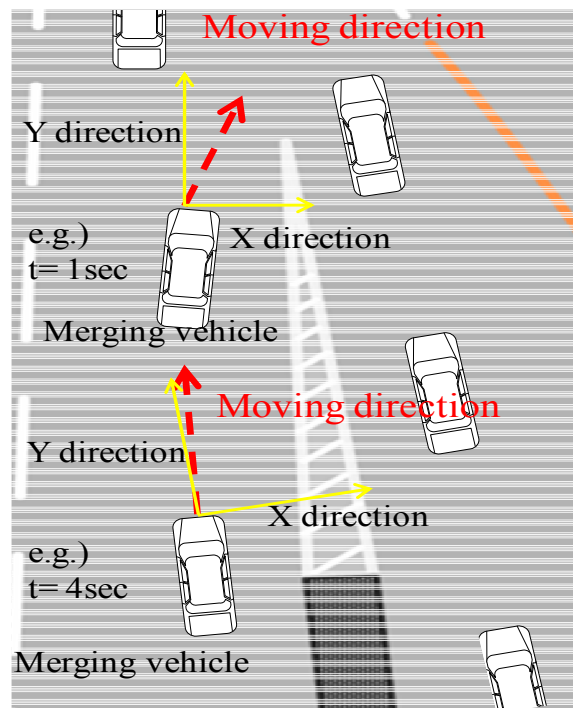


図 6.19 合流車両の進行方向

同じく X 方向の相対距離も，また，導流帯終点に近づくほど，合流車両は加速する負(-)の関係を持つ．これは合流車両が Y, X 方向皆の進行方向を持つだけでなく，上で記述した通り前方車両の加速可否が影響を及ぼすからだ．つまり，導流帯終点に近づくほど，X 方向の相対距離は小さくなるが，合流車両はもう選択したギャップに流入するため，前方車両の加速可否と等しく，そして後方車両より前に出ようと加速する状況を予想できる．したがって，合流する時，合流車両の加・減速は前方車両の加・減速に影響を受けて，追従することを分かる．

上の結果から，追従車両の加速傾向は確実に前方車両 M_1 , L_1 ，後方車両 L_0 に影響を受けていると走行するという事実が明らかである．よって，先述した相関関係の結果を基本に選定した相対速度と相対距離の説明変数に‘前方及び後方車両 M_1 , L_1 の加・減速状態’に関するダミー変数（加速/減速=1/0）を加えた．また，本対象区間は主道路である 2 本の道路が構造的に合流しながら一つの車線になる区間なので，導流帯終了地点から合流車両がどこに位

置しているかによって、多重追従合流挙動が変わる。よって、構造的に完全に合流が完了する地点 $Y=560\text{m}$ を基準とし、 $Y=560\text{m}$ から合流車両の位置までの距離‘ $Y=560\text{m}$ 地点までの残り距離’を説明変数として考慮した。

上で記述した通り、本合流区間では導流帯終点に近づくほど、相対距離は小さくなるが、合流車両は加速することが分かる。つまり、前方及び後方車両との正の相対速度を持って、また、この車両が加速する状況への合流車両は相対距離が短い、前方及び後方車両の影響によって加速する傾向を持つことを予想できる。合流挙動において、一般的に相対速度と相対距離が最も影響力がある要因だ。しかし、2車線が1車線に合流される本対象区間では、導流帯終点に近づくほど、相対速度、相対距離だけでなく、前方及び後方車両の加・減速の可否も影響を及ぼすから、この要因を考慮する必要がある。また、基本的にこの要因は、導流帯終点に近づくほどもっと明らかに現れるから、合流挙動において導流帯終点は重要な意味を持つ。よって、本研究では、この要因が合流挙動に及ぶ影響を考慮するため、説明変数として加えた。この要因によって、相対速度、相対距離だけで表現が不足な多重追従合流挙動を、よく説明できることを期待する。よって、上で提示した説明変数と‘前方車両 M_1 , L_1 の加速状態ダミー A_{M1} , A_{L1} ’と‘ $Y=560\text{m}$ 地点までの残り距離’も考慮して、合流車両との加速度と相関関係を分析した。表 6.5 は守口線と環状線合流車両に対して、相関係数の値を見せてくれる。表 6.4 の結果上、添加した変数の相関結果を見ると、守口線合流車両の場合は、新しく考慮した変数皆統計的に相関性があることがあかり、環状線合流車両では走行本車線の前車両の加速可否が弱い相関性を持つことで現れた。

表 6.5 守口線合流車両と環状線合流車両に対する説明変数と合流車両の加速
速度の相関関係

守口線合流車両			環状線合流車両		
説明変数	相関関係	Sig	説明変数	相関関係	Sig
α_{M1}	0.529	0.000	α_{M1}	0.907	0.000
α_{M2}	0.579	0.000	α_{M2}	0.78	0.000
α_{L0}	0.17	0.060	α_{L0}	0.591	0.000
α_{L1}	0.5	0.000	α_{L1}	0.784	0.000
α_{L2}	0.396	0.201	α_{L2}	0.496	0.080
β_{M1}	-0.369	0.000	β_{M1}	-0.405	0.000
β_{M2}	-0.386	0.000	β_{M2}	-0.040	0.000
β_{L0}	0.008	0.759	β_{L0}	0.299	0.052
β_{L1}	-0.423	0.001	β_{L1}	0.584	0.000
β_{L2}	-0.076	0.000	β_{L2}	0.366	0.000
γ_{L0}	-0.385	0.000	γ_{L0}	-0.232	0.146
γ_{L1}	-0.383	0.000	γ_{L1}	-0.419	0.000
γ_{L2}	-0.278	0.046	γ_{L2}	-0.314	0.086
A_{M1}	0.592	0.000	A_{M1}	0.361	0.000
A_{L1}	0.558	0.000	A_{L1}	0.040	0.075
y	-0.451	0.000	y	-0.403	0.000

ここで、

A_{M1} ：合流車線の1番目の前方車両との加・減速可否

A_{L1} ：走行本車線の1番目の前方車両との加・減速可否

Y：y=560m 時点まで残った距離

である。

以上を踏まえ、信頼性が高い多重追従合流モデルを構築するため、守口線合流車両の場合、走行本車線での後方車両と2番目の前方車両の相対速度(α_{L0} , α_{L2})とY方向の相対距離(β_{L0} , β_{L2})を除く残りの説明変数(α_{M1} , α_{M2} , α_{L1} , β_{M1} , β_{M2} , β_{L1} , γ_{L0} , γ_{L1} , γ_{L2} , A_{M1} , A_{L1} , y)を用いて、守口線合流車両の多重追従合流挙動を分析する。環状線合流車両に対しては上述した通り、同一車線での2番目の前方車両との相対速度(α_{L2})、走行本車線の後方車両に対するY方向及びX方向の相対距離(β_{L0} , γ_{L0})、2番目の前方車両とのX方向の相対距離(X_{L2})、そして走行本車線の後方車両の加・減速可否(A_{L1})を除き、残りの変数(α_{M1} , α_{M2} , α_{L0} , α_{L1} , β_{M1} , β_{M2} , β_{L1} , β_{L2} , γ_{L1} , A_{M1} , y)を用いて多重追従合流挙動のモデルに対するパラメータを推定する。よって、前に示した式6.2の多重追従合流モデルの式は加えられる説明変数によって式6.3のように再構成できる。

$$\begin{aligned}
a_i(t+T) = & \sum_{j=1}^{m_1=2} \{(\alpha_{Mi}^{(j)} \Delta v_{Mi}^{(j)}(t)) + (\beta_{Mi}^{(j)} |\Delta y_{Mi}^{(j)}(t)|)\} \\
& + \sum_{j=0}^{m_2=3} \{(\alpha_{Li}^{(j)} \Delta v_{Li}^{(j)}(t)) + (\beta_{Li}^{(j)} |\Delta y_{Li}^{(j)}(t)|) + (\gamma_{Li}^{(j)} \Delta x_{Li}^{(j)}(t))\} \\
& - \left(\sum_{j=1}^{m_1=2} \beta_{Mi}^{(j)} S_{Mi}^{(j)} + \sum_{j=0}^{m_2=3} \beta_{Li}^{(j)} S_{Li}^{(j)} \right) + \delta_{Mi}^{(j=1)} A_{Mi}^{(j=1)} + \varepsilon_{Li}^{(j=1)} A_{Li}^{(j=1)} + \vartheta y \\
& \text{変数 } D(t)
\end{aligned}$$

式 6.3

式 6.3 で加えられるパラメータは

$\delta_{Mi}^{(j=1)}, \varepsilon_{Li}^{(j=1)}$: 前方車両(M₁, L₁)の加減速状態ダミー（ダミー変数）に対する多重
合流車両の感度パラメータ

ϑ : 合流完了時点(Y=560m)まで残った Y 方向の距離

$A_{Mi}^{(j)}$: 同じ車線(M)の前方車両 j=1 の加速可否（加速/減速=1/0）

$A_{Li}^{(j)}$: 走行本車線(L)の前方車両 j=1 の加速可否（加速/減速=1/0）

y : 合流完了時点(Y=560m)まで残った Y 方向の距離

である．

(2) 多重追従合流挙動に対する推定結果及び分析

関連分析結果に基づいて、守口線と環状線合流車両に多重追従モデル
 Generalized Helly model を適用して、決定係数が最も高くなるパラメータ $\alpha_{Mi}^{(j)}, \alpha_{Li}^{(j)},$
 $\beta_{Mi}^{(j)}, \beta_{Li}^{(j)}, \gamma_{Li}^{(j)}, \delta_{Mi}^{(j=1)}, \varepsilon_{Li}^{(j=1)}, \vartheta$ と反応時間(T)の推定を行った．その結果を表 6.6~6.7
 に示す．分析の結果、守口線及び環状線合流車両に対する多重追従合流モデル
 の決定係数(Adjust R²)はそれぞれ 0.67, 0.87 と統計的に有意であり、両方
 とも合流車両の多重追従合流挙動に対する説明力がかなり高くなっている．
 また、説明変数のパラメータの t 値を見れば、皆 1%の有意水準で統計的に有
 意したことで現れた．このような結果は、合流車線及び走行本車線の車両と
 合流車両との関係で、合流車両の多重追従合流挙動をよく表現できることを
 意味する．これは、前述したように合流車両は合流の時、合流車線の前方車
 両だけではなく、横の車線（走行本車線）の前方車両と後方車両との関係に
 応じて追従・合流するという仮説の正当性を裏付けている．また、説明変数
 間の相関性を検討するため、表 6.6~6.7 に提示したように多重共線性の検定
 を行った．多重共線性(multi-collinearity)と、3 つ以上の独立変数間の関係を
 意味するもので、独立変数間相関係数が 1 であれば完璧な共線性(complete
 collinearity)を持ち、反対に 0 であれば完全に(complete lack of collinearity)が
 ないことを意味する．この検定にあたり、Tolerance(VIF=1/Tolerance)がある．
 これは多重回帰分析モデルの説明変数に対して、1 つの説明変数を被説明変

数で設定して、残り説明変数で回帰分析を実施して Tolerance（決定係数）が 10 以下(0.9 以上)であると、統計的に多重共線性がないことを意味する．表 6.6~6.7 を見ると、すべてパラメータの VIF（決定係数）値が 10 以下(0.9 以上)なので、守口線と環状線合流車両の説明変数間の関係が統計的にないことが分かる．

まず、推定した守口線合流車両のパラメータを比べると、走行本車線の前方車両との相対速度(α_{L1})、Y 方向及び X 方向の相対距離(β_{L1} , γ_{L1})に対して、最も敏感に反応して走行することが分かる．前方車両に対する加速可否は反対に、走行本車線の前方車両(A_{L1})より、同一車線の前方車両(A_{M1})の方が合流車両の加速に大きな影響を及ぼすことが分かった．これは、守口線合流車両は合流する時、走行本車線の車両 L1 との相対関係に最も敏感に反応し、走行することを意味する．また、走行本車線の車両より合流車線の車両の加速可否にもっと意識して、多重追従合流挙動が現れることが見える．

次に標準化係数に着目し、相対速度、Y 方向の相対距離、X 方向の相対距離そして加減速状態ダミーの絶対値を比べた．まず、相対速度に対しては走行本車線の前方車両(α_{L1})の影響力が最も大きく、次いで、合流車線上の前方車両(α_{M1})そして 2 番目の合流車両(α_{M2})であった．ここで、パラメータ α_{L1} が合流車両に与える影響を 1 とするとこの車両に比べて、同一車線の 1 番目の前方車両 α_{M1} は 0.88, 2 番目の前方車両 α_{M2} は 0.41 程度、合流車両に影響を及ぼすことを分かる．Y 方向の相対距離も、影響力が最大であるパラメータ β_{L1} を基準で比較すると、それぞれ 0.88(Y_{m1}), 0.35(Y_{m2})程度の影響を及ぼしている．過減速状況に関するダミー変数に関しては、同一車線の一番目の前方車両(A_{M1})が、走行本車線の一番目の前方車両(A_{L1})の約 1.04 倍の影響を及ぼすことで現れた．ここで、合流車両は同じ合流車線の車両より走行本車線の車両にもっと反応することを予想できる．また、合流車両を基準で、遠くある車両であるほど、近くにある車両よりパラメータの値が小さいことが見える．これは最も近くにある車両の影響力が多重追従挙動に対する最も大きいものを意味する．しかし、守口線合流車両の多重追従合流挙動を説明するためには、同じ合流車線の車両だけではなく、走行本車線の車両皆考慮する必要がある．また、2 番目の前方車両の影響力は小さいが、合流車両はこの車両も反応して走行するので無視することができない．

表 6.6 守口線合流車両の多重追従合流車両モデルの分析結果

Adj. R ²	F	Sig.	T
0.672	488.120	0.000	1.0sec

Variable	Parameter	Standardized Parameter (Order)	t	Collinearity Statistics	
				R ² (Tolerance)	VIF
Constant	-3.98E-02		-0.629		
α_{M1}	0.113	0.252(2)	12.052*	0.486	2.057
α_{M2}	3.56E-02	0.117(3)	5.309*	0.436	2.294
α_{L1}	0.103	0.287(1)	15.627*	0.632	1.582
β_{M1}	2.00E-03	0.182(2)	7.371*	0.401	2.493
β_{M2}	-8.83E-03	-0.072(3)	-3.302*	0.265	3.774
β_{L1}	1.02E-02	0.207(1)	10.579*	0.473	2.115
γ_{Lo}	-5.91E-02	-0.072(2)	-3.476*	0.492	2.031
γ_{L1}	-5.06E-02	-0.127(1)	-4.829*	0.307	3.252
A_{m1}	0.262	0.231(1)	12.347*	0.607	1.646
A_{l1}	0.251	0.217(2)	11.576*	0.605	1.654
y	3.54E-03	0.13	3.987*	0.2	4.996

(有意水準：*=0.001)

環状線合流車両の場合は守口線合流車両の結果とは異なり、相対速度に対しては、走行本車線の車両より合流車線の前方車両 α_{M1} に最も敏感に反応して走行していることをわかった。これと反対に、Y 方向の相対距離については、走行本車線の車両 β_{L1} に最も敏感に反応する結果となっている。X 方向の相対距離に関しては、走行本車線の後方車両 γ_{Lo} だけが合流車両に影響を及ぼすことに現れた。また、加減速状況ダミーに対しては、走行本車線（守口線）の車両 A_{L1} のみが、多重追従合流挙動に影響力を持っている。

相対速度、Y 方向の相対距離に対する標準化係数の絶対値を比較すると、相対速度に対しては前方車両 α_{M1} の影響力が最も大きく、続いて走行本車線の 1 番目の前方車両 α_{L1} 、後方車両 α_{L0} 、最後に合流車線の 2 番目の前方車両 α_{L2} という順番になった。ここで、合流車両は相対速度に対しては合流車線の車両が、相対距離については走行本車線の車両にもっと応じることをわかった。また、最も近くにある 1 番目の前方車両 α_{M1} 、 α_{L1} が合流車両に及ぼす影響力が最も大きく、一番遠く位している 2 番目の車両 α_{M2} に一番弱く応じることを分かった。この傾向は Y 方向の相対距離にも等しく現れることをわかった。また、相対速度に対して最も影響力が大きい合流車線の前方車両 α_{M1} に関する影響を 1.0 と仮定すると、走行本車線の 1 番目の前方車両 α_{L1} は 0.12、後方車両 α_{L0} は 0.11、そして 2 番目の前方車両 α_{L2} は 0.08 程度の影響を持つことを分かった。Y 方向の相対距離に対しては、走行本車線の 1 番目の前方車両 β_{L1} に比べて、合流車線の 1 番目の前方車両 β_{M1} 、2 番目の前方車両

β_{M2} はそれぞれ 0.32, 0.19 程度, そして走行本車線の 2 番目の前方車両 β_{L2} は約 0.29 程度の影響を及ぼす結果となった. ここで, 最も近くにある車両, つまり 1 番目の前方車両と後方車両の影響力が多重追従挙動に対する大きいのを意味する. そして, 合流車両は最も遠くにある車両, つまり 2 番目の前方車両に弱く応じることを意味する. しかし, 環状線合流車両の多重追従合流挙動を説明するためには, 同じ合流車線の車両だけではなく, 走行本車線の車両皆考慮する必要がある. また, 2 番目の前方車両の影響力は小さいが, 合流車両はこの車両も応じて走行するので無視することができない.

表 6.7 環状線合流車両の多重追従合流車両モデルの分析結果

Adj. R ²	F	Sig.	T
0.873	1269.863	0.000	0.8sec

Variable	Parameter	Standardized Parameter (Order)	t	Collinearity Statistics	
				R ² (Tolerance)	VIF
Constant	0.216		3.745		
V _{M1}	0.595	0.652(1)	39.706**	0.232	4.314
V _{M2}	3.93E-02	0.052(4)	3.634**	0.311	3.216
V _{L0}	6.11E-02	0.07(3)	5.818**	0.43	2.328
V _{L1}	7.38E-02	0.078(2)	4.626**	0.222	4.495
Y _{m1}	-1.97E-04	-0.055(2)	-4.811**	0.201	4.982
Y _{m2}	-5.20E-03	-0.032(4)	-2.092*	0.162	6.172
Y _{L1}	3.58E-02	0.172(1)	13.197**	0.366	2.73
Y _{L2}	7.86E-03	0.050(3)	5.646**	0.335	2.987
X _{L0}	8.00E-02	0.055	4.538**	0.427	2.341
A _{L1}	0.358	0.114	12.403**	0.74	1.351
y	-2.59E-03	-0.082	-6.89**	0.225	4.454

(有意水準 : *=0.05, **=0.001)

守口線と環状線合流車両に対する多重追従合流モデルの結果を比べると, 守口線合流車両は合流時, 走行本車線(環状線)の 1 番目の前方車両 L₁ との相対速度 V_{L1}, Y 方向と X 方向の相対距離 Y_{L1}, X_{L1}, 加速可否 A_{L1} に最大の影響を受けて走行する. 一方で環状線合流車両は, 相対速度に対しては同一車線(環状線)の 1 番目の前方車両 V_{M1} に, Y 方向の相対距離と加速可否に対しては走行本車線(守口線)の 1 番目の前方車両 Y_{L1}, A_{L1} に, X 方向の相対距離に対しては走行本車線(守口線)の後方車両 A_{L0} に最も敏感に応じて走行することが分かる. この結果は, 6.3 節で示した多重追従合流挙動に対する仮説, すなわち ‘合流車両が同一車線への前方車両だけではなく, 選択したギャップを構成する横の走行本車線の周辺車両の行動にも応じて行動を決

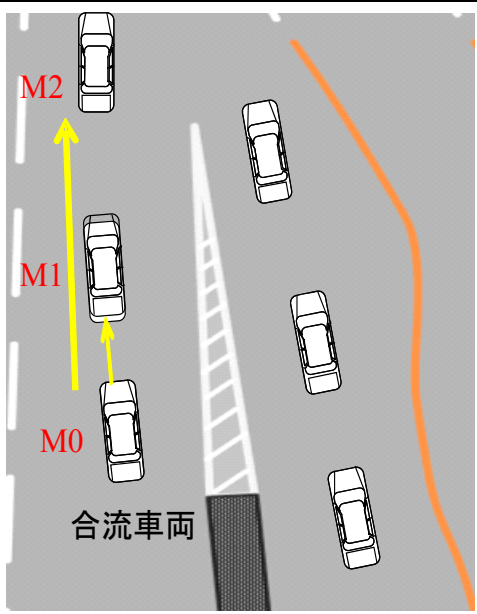
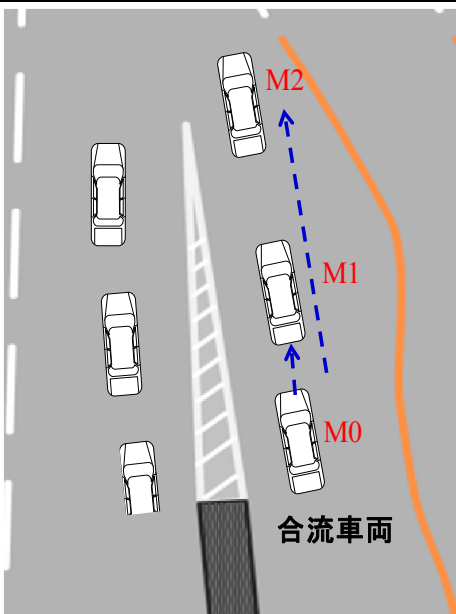
める’という、つまり‘合流時、追従しながら合流する 2 つの行動が現れる’
ということを示唆している。すなわち、合流車両は選択したギャップに流入
するため、同一車線の前方車両だけではなく、横の車線（走行本車線）の車
両にも影響を受けて走行するといえる。

また、守口線と環状線合流車両の多重追従合流挙動の差に着目すると、影
響を受ける車両が異なることが読み取れる。具体的には、守口線合流車両の
場合は、同一車線（守口線）上の車両よりは走行本車線（環状線）の前方車
両に強い影響を受けるのに対し、環状線合流車両の場合、同一車線（環状線）
の前方車両の相対速度、及び走行本車線（守口線）の 1 番目の前方車両の Y
方向相対距離の影響力が大きいことが分かる。また、守口線合流車両にはあ
まり影響力を持たなかった後方車両が、環状線合流車両には影響を及ぼす結
果となった。これは、2 つの車線の交通量、平均速度などの交通特性が異なる
ためであると考えられ、モデルの適用に際して十分な注意が必要であるとい
える。

6.3.5 本来の多重追従挙動と合流車両の合流追従挙動の比較

同一車線の前方車両だけでなく、横の車線（走行本車線）の周辺車両を考
慮した多重追従合流モデルが、同一車線の前方車両のみを考慮した本来の多
重追従モデルより合流車両の挙動をよく表現するということを表すため、多
重追従合流モデルと本来の多重追従モデルを比べた。この時、2 つのモデル
の比較のために、多重追従合流モデルの構築時に利用したのと同じ合流車両
に対するデータを利用した。すなわち、多重追従合流モデルで同一車線の 2
番目の前方車まで考慮したように、本来の多重追従モデルを構築する際にも、
同一車線の 2 番目の前方車両まで考慮した。つまり、表 6.8 のように合流車
両 M_0 は、前方車両である M_1 , M_2 を追従する。この時、同一車線の前方車両
は多重追従合流モデルで利用した車両 ID が同じ車両を利用したが、これら
は前に示した追従車両の定義である前方車両との車尾時間が 3 秒以内という
条件を満足する車両だ。また、追従時間は同様に 5 秒以上のものを選定して、
最小二乗法でパラメータを推定した。推定の結果、守口線合流車両と環状線
合流車両に対する多重追従合流挙動モデル（表 6.6~6.7）が、本来の多重追従
モデルより決定係数の値が高くなった。よって、多重追従合流モデルが本来
の多重追従モデルより、より合流車両の挙動を説明することが分かる。パラ
メータを比べると、多重追従合流モデルと同様に、二番目の前方車両より一
番目の前方車両に対する相対速度と相対距離により敏感に応じて追従するこ
とが分かる。

表 6.8 守口線合流車両と環状線合流車両に対する本来の多重追従モデル結果

							
守口線合流車両(78 台)				環状線合流車両(93 台)			
Adj. R^2	F	Sig	T	Adj. R^2	F	Sig	T
0.407	276.045	0.000	1.0sec	0.677	917.069	0.000	0.8sec
Variable	Parameter	Standazied Parameter	t	Variable	Parameter	Standazied Parameter	t
V_{M1}	0.118	0.380	10.303	V_{M1}	0.503	0.589	25.615
V_{M2}	0.096	0.266	12.309	V_{M2}	0.180	0.255	11.478
Y_{M1}	-0.009	-0.215	-7.272	Y_{M1}	-0.004	-0.056	-2.054
Y_{M2}	-0.002	-0.029	-2.954	Y_{M2}	-0.001	-0.004	-1.963

6.4 多重追従合流挙動のシミュレーション

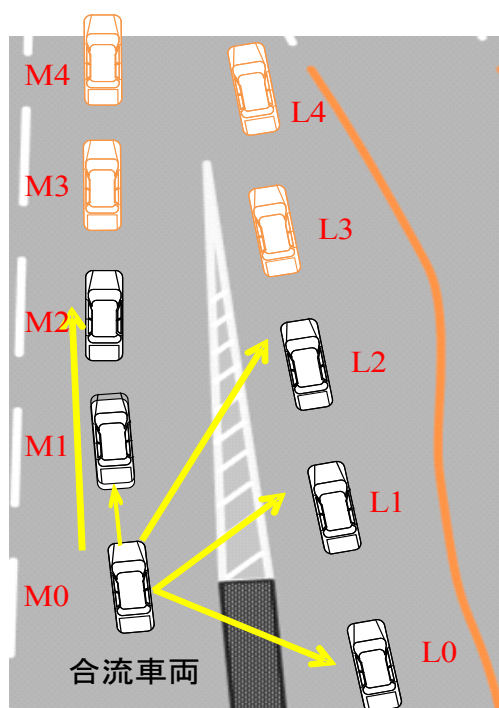
6.4.1 多重追従合流挙動シミュレーションの概要

本節では，6.3 節で構築した多重追従合流挙動モデル（表 6.6 と表 6.7 の結果）を利用して，合流挙動のシミュレーションを行う．

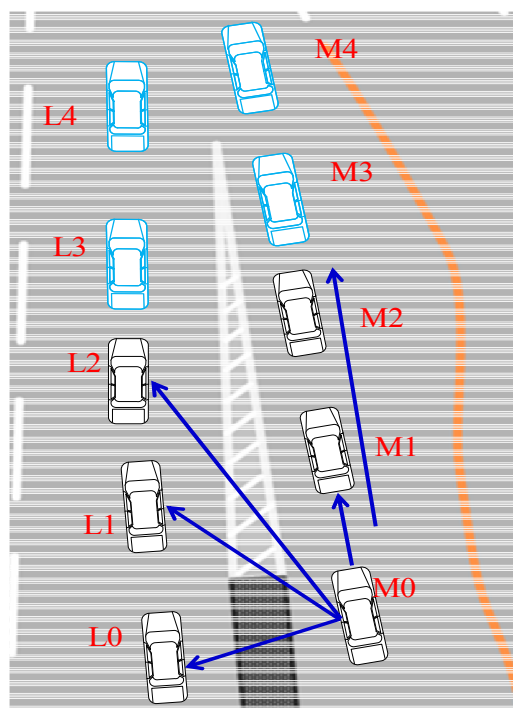
多重追従合流挙動に対する交通シミュレーションを実施するために，守口線・環状線合流車両の両方で，合流車両(M0)を基準として，まず，最も下流側の車両である同一車線（合流車線）と横車線（走行本車線）の 2 番目の前方車両(M2, L2)に対して，構築した多重追従合流挙動モデルで車両の追従合流挙動を推定する必要がある．この時，合流車両(M0)の多重追従合流挙動の推定時に適用した方法を同様に適用した．つまり，2 番目の前方車両(M2, L2)の多重追従合流挙動を推定する場合は，同一車線での 2 台の前方車両と横車

線の 3 台の車両を考慮した。したがって、守口線合流車両（又は、環状線合流車両）の同一車線の 2 番目の前方車両(M2)の多重追従合流挙動を推定する際には、図 6.20 のように車両 M2 を基準に、同一車線の前方車両(M3, M4)と横の車線の周辺車両(L3, L4, L2)に対して実際の車両データを利用した。反対に、守口線合流車両（又は、環状線合流車両）の横車線の 2 番目の前方車両(L2)に対しては、図 6.20 のように同一車線の前方車両(L3, L4)と横の車線の周辺車両(M3, M4, M2)の実際の車両データを利用して、多重追従合流挙動を推定した。

次に、先に推定した 2 番目の前方車両(M2, L2)の車両データを利用して、同一車線と横車線の 1 番目の前方車両(M1, L1)の多重追従合流挙動を推定した。この時、図 6.20 のように車両 M1 を基準に、同一車線の前方車両(M2, M3)と横車線の周辺車両(L3, L2, L1)の車両データを利用する。ここで、車両 M3, L3, L1 に対しては実観測データを利用するが、車両 M2, L2 には先に推定した車両データを適用して、多重追従合流挙動を推定した。反対に、車両 L1 を推定する際には、車両 L3, M3, M1 には実観測データを、車両 M2, L2 には先に推定したデータを適用して多重追従車両挙動を推定した。最後に、車両 M0 の多重追従合流挙動を推定する際には、図 6.20 のように、先に推定した車両 M2, M1, L2, L1 のデータと車両 L0 の実データを利用した。このデータを用いて、守口線合流車両の場合は守口線多重追従合流モデルを利用し、環状線合流車両の場合は環状線多重追従合流モデルを適用して、合流車両 M0 の多重追従合流挙動を推定した。このような過程で、本研究の対象合流車両である M0 に対する交通シミュレーションを行った。



守口線合流車両



環状線合流車両

図 6.20 合流車両のシミュレーションを実施するための、
車両の多重追従合流挙動の推定方法の紹介

6.4.2 多重追従合流挙動シミュレーションの検証方法

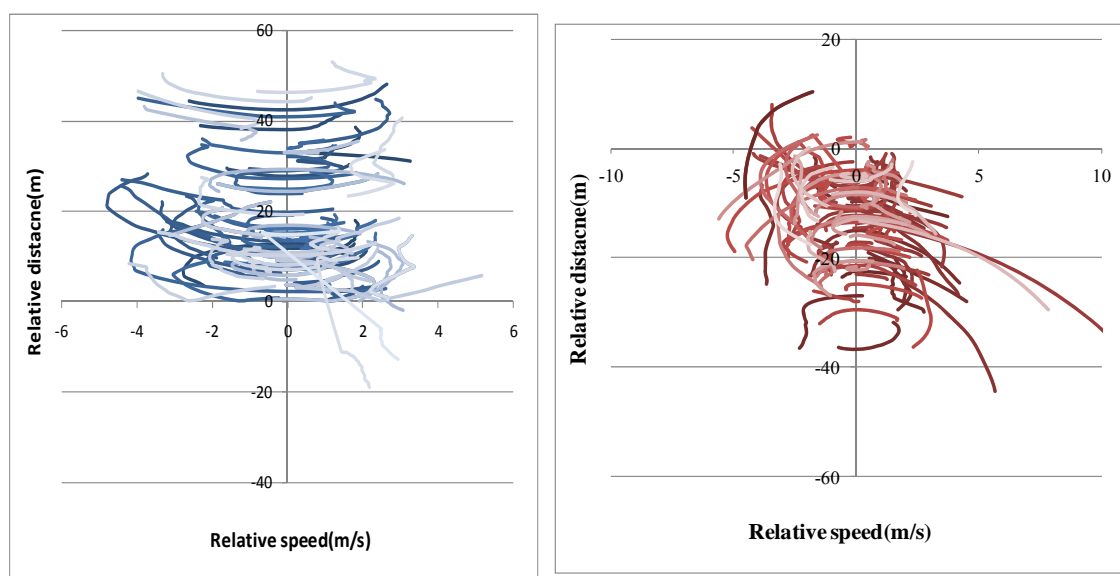
シミュレーションの現況再現性に当たり一般的には、交通シミュレーションの検証では、シミュレーション結果で得られた車両の速度や加速度が実データとどれ程近い値を持つかを検証することが多い。本研究で対象とする合流部では、2つの車線が構造的に1車線になる区間で交通流の錯綜が生じやすく、交通流の効率性や安全性が著しく低下する区間である。そこで、本研究では、効率性の観点より相対速度-相対距離の関係を、安全性の観点より TTC(Time to Collision)を検証指標とし、シミュレーションの現況再現性の検証を行う。

ただし、効率性に関して相対速度-相対距離の関係を検証指標としたのは以下の理由による。すなわち、多重追従合流挙動時に、合流車両の自車速度はもちろん挙動に影響を及ぼすが、実際の合流車両は合流しようとする車線の車両との相対速度や相対距離にも敏感に応じてから、その関係によって合流行動を決めると考えられるからである。さらに、相対速度と相対距離は、シミュレーションした合流車両と選択ギャップ構成車両の加速度（速度）から算定するので、この値が近い時、合流車両の加速度（速度）だけでなく、さらに合流車両に影響を及ぼす車両の加速度（速度）もよく推定できている

ことを意味する。また，実車両データを用いた場合，6.2 節で示したように，合流車両と選択ギャップ構成車両間の相対速度-相対距離の関係がスパイラル曲線を描いて分布しており，合流車両が横の車線を意識して追従し，合流することが分かった。このような関係が，推定したシミュレーションでも現れるかどうかを確かめるためにも，相対速度と相対距離を検証指標に選定した。

6.4.2 交通効率性に関するシミュレーションの検証

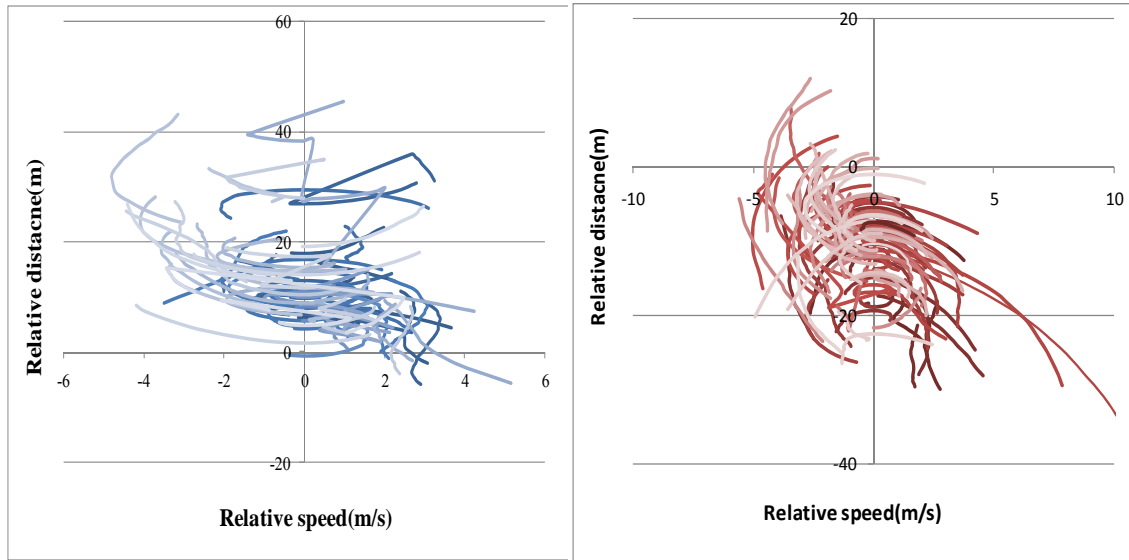
検証する際，実観測によるデータの結果とシミュレーション結果との比較条件を同等に設定するために，すべて合流完了時点から 5 秒前までの走行データを用い，相対速度-相対距離の関係を分析した。このとき，合流車両と選択ギャップを構成する前方車両との相対速度-相対距離の関係を図 6.21 に，実データのうち合流完了時点から 5 秒前のデータを利用して分析した相対速度-相対距離の関係を図 6.22 に示す。



守口線合流車両

環状線合流車両

図 6.21 合流車両と選択ギャップを構成する前方（又は後方）車両との相対速度-相対距離のシミュレーション結果



守口線合流車両

環状線合流車両

図 6.22 合流完了時点から 5 秒前の実データによる，合流車両と選択ギャップを構成する前方（又は後方）車両との相対速度-相対距離の関係

図 6.21 と図 6.22 を比較すると，守口線と環状線の合流車両の相対速度-相対距離の関係が，シミュレーション結果と実データ結果で似たような反時計回りのスパイラル曲線を描きながら分布していることが分かる．また，環状線合流車両の方が守口線合流車両よりも実データと形態が似ている結果となった．実観測データとシミュレーション結果の関係を統計的に分析するため，本研究では，相対速度と相対距離についての相関を分析した．図 6.23 は守口線合流車両と環状線合流車両の相対速度・相対距離の相関係数別頻度を表す．比較すると，相関係数の値が 0.5~0.9 となる車両の相対速度・相対距離の構成割合が，守口線合流車両の場合は全車両の 82%,77%であり，環状線合流車両の場合は 86%,85%であった．これよりシミュレーション結果と実データ結果の相関が強いといえる．したがって，シミュレーション結果により，実際はかなり近い車両挙動を表現できると考えられる．また，守口線合流車両と環状線合流車両間の相関係数を比べると，環状線合流車両の方が，シミュレーション結果と実データ結果の相関が高い．したがって，シミュレーションは，守口線合流車両よりも環状線合流車両の実車両の挙動をよく表現していることが分かる．これは表 6.7 と表 6.8 に示した，環状線合流車両の方が守口合流車両よりも決定係数が大きいという結果と一致する．

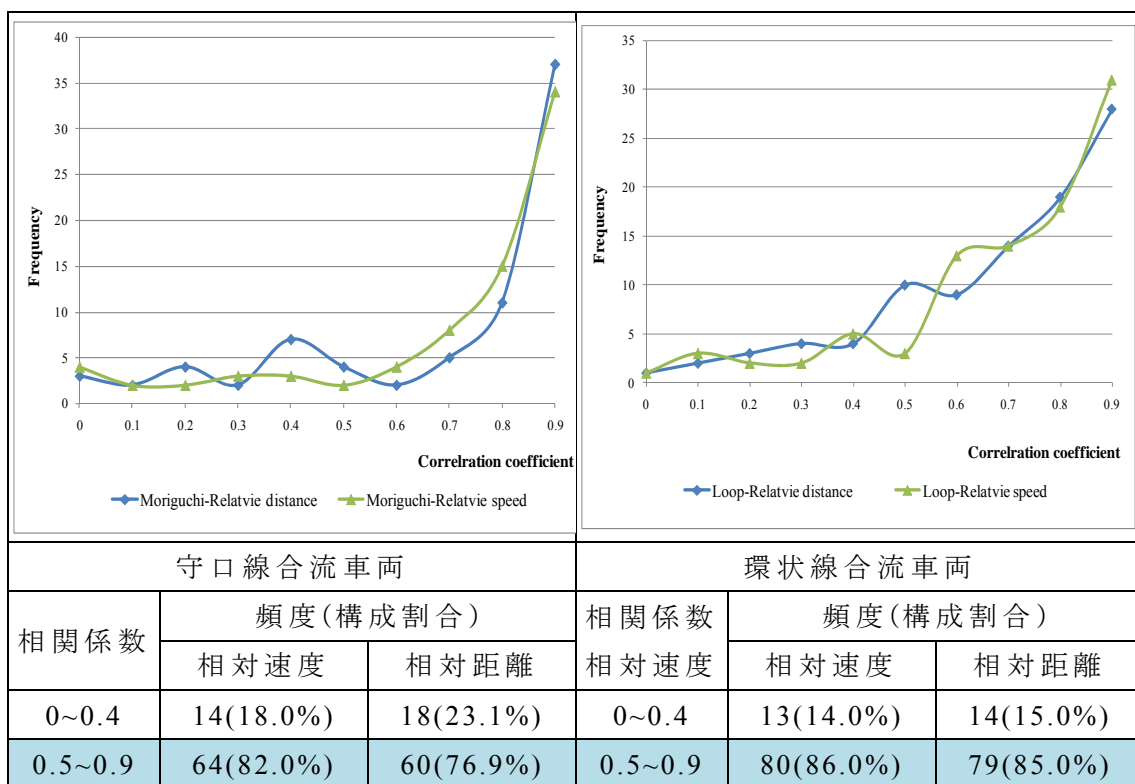


図 6.23 実際データ結果とシミュレーション結果の相対速度，
相対距離に対する相関分析結果

また，合流車両別に相対速度と相対距離の比較を行うと，どちらの合流車両においても，相対速度の方が相対距離に比べて相関係数の値が 0.5~0.9 となる車両の割合が大きい．これは，シミュレーションでは相対速度の方が相対距離よりも実観測データに近いことを意味する．この結果は，相対速度と相対距離の単位が一致せず，相対速度の方が相対距離よりも一般的に小さくなることに起因していると考えられる．

上の分析結果から，シミュレーションが実車両の挙動をよく表現できることがわかった．しかし，シミュレーション結果には，実データ結果との相関係数の値が 0.5 よりも小さく，関係が希薄な車両も存在する．これは，構築した多重追従合流モデルでは，多重追従合流挙動をよく表現できない実車両も存在することを意味する．構築したモデルは全合流車両の 70%，90%を表現できる説明力を持つが，多重追従合流挙動には運転者間に異質性が存在する可能性があるため，よく表現できない車両挙動が現れたと考えられる．これは，今後の研究で改善すべき点といえる．

6.4.2 交通安全性に関するシミュレーションの検証

6.4.1 項では，効率性の面から相対速度と相対距離を指標とし，実データ結

果とシミュレーション結果との相関関係を分析し、シミュレーションが実際の多重追従合流挙動を高精度に再現できていると考えられる。本項では、安全性の面から選んだ指標、つまり潜在的に危ない車両を利用して、守口線と環状線合流車両の潜在的な危険度を評価し、構築したシミュレーション結果を検証する。

(1) 合流部におけるコンフリクト指標の定義

本研究では、車両相互事故の潜在的な危険性を表すため、最も代表的なコンフリクト指標である TTC(Time to Collision)を利用して、本対象合流区間に対する交通コンフリクト指標を定義した。TTC(Time to Collision)とは‘もし 2 台の車両がその時点での速度と進行方向をそのまま維持した場合、車両が衝突するまでの残された時間’を指し、式 6.4 のように算出される。

$$TTC = \frac{S_0}{V_2 - V_1} \quad \text{式 6.4}$$

ここで、 V_2 : 先行車両の速度(m/s)、 V_1 : 後続車両の速度(m/s)、
 S_0 : 先行車両と後続車両間の距離(m)
 である。

一般的に式 6.4 の TTC は、同一車線での車両の衝突危険性を表す指標となる。しかし、本研究では合流車両の潜在的危険性が分析対象なので、合流車両と横車線（走行本車線）の選択ギャップ構成車両（前方又は後方）との衝突危険性を対象とする。そこで、各車両の相対位置を相対速度で除して、2 台の車両の Y 座標が等しくなる時間、すなわち、2 台の車両が現在速度を保ち続けた時に 2 台の車両の Y 座標が横並びになるまでの時間として合流区間の TTC*を定義する。合流区間での TTC*算出方法は式 6.5 になる。

$$TTC^* = -\frac{Y_2 - Y_1}{V_2 - V_1} \quad \text{式 6.5}$$

ここで、

TTC^* : 合流区間での 2 台の車両が横並びになるまでの時間(s)

Y_1 : 合流車両の Y 座標(m)

Y_2 : 走行本車線の選択ギャップを構成する前方（後方）車両の Y 座標(m)

V_1 : 合流車両の速度(m/s)

V_2 : 走行本車線の選択ギャップを構成する前方（後方）車両の速度(m/s)

である．

横並びになるまで時間である TTC^* の時間が短いほど，潜在的に危険な合流と考えられる．しかし，横並びになる時点の Y 座標が合流部と距離が遠ければ，これは合流において完全に危険な状況とは言えない．よって，横並びになる時点の Y 座標 (Y_c) の算定する必要があり，その算定式を式 6.6 に示す．したがって，式 6.5 で算出した TTC^* が短く，式 6.6 で算出した横並び時点の Y 座標が合流区間にある時には，合流車両と横車線との車両は危険な合流挙動と考えられる．

$$\hat{Y}_c = TTC^* \cdot V_1 + Y_1 = TTC^* \cdot V_2 + Y_2 \quad \text{式 6.6}$$

ここで，

\hat{Y}_c : 2 台の車両が現在の速度を保ち続けたときに横並びになる地点の Y 座標(m) である．

(2) コンフリクト指標に基づくシミュレーション結果の検証

本研究ではまず，合流区間を図 6.1 のように導流帯が終了する $Y=530\text{m}$ から合流完了ラインである $Y=560\text{m}$ までと定義した．その区間内で横並びになるまでの時間 (TTC^*) が 5 秒以下である合流車両と横の車線の車両を潜在的に危ない合流挙動を見せる車両であると考えられる．その上で安全性の面からシミュレーション結果を検証するために，実データ結果とシミュレーション結果を用いて潜在的に衝突危険性の高い車両を抽出した．抽出の結果，表 6.8 のように実データでは，守口線合流車両では全 78 台の車両のうち 14 台 (19.2%)，環状線合流車両では全 93 台中 23 台 (24.7%) が潜在的に危ない車両であった．シミュレーションでは，守口線合流車両では 19 台 (24.3%)，環状線の合流車両では 25 台 (26.8%) となった．つまり，守口線合流車両に比べて環状線の合流車両の方が，潜在的に危ない車両が多いことが分かる．このことから守口線合流車両よりも環状線合流車両の方が合流時に，潜在的な走行危険性が高いことが分かる．

表 6.8 実データとシミュレーションの結果で危険な合流車両の観測数

区分		守口線合流車両		環状線合流車両	
実データ結果	車両台数	14	5 台	23	2 台
	構成割合	17.9%		24.7%	
シミュレーションの結果	車両台数	19	5 台	25	2 台
	構成割合	24.3%		26.8%	

また、シミュレーション結果と実観測データを比較すると、シミュレーションの方が、守口線合流車両の場合は5台、環状線合流車両の場合は2台多く推定している。実観測データにおいて潜在的に危ない車両と判定された車両はすべて、シミュレーションでも危ない車両と検出されており、シミュレーションでは、危険車両を実際より過大に検出する傾向があるといえる。

そこで、シミュレーションと実データの結果をさらに詳しく検証するため、本研究ではTTC*の指標を利用して、潜在的に危ない車両が現れた時刻を実際データ結果とシミュレーション結果について比較した。その結果、図6.24と図6.25に示すように、守口線合流車両と環状線合流車両の両方ともに同じ時刻に潜在的に危ない車両が現れるものの、守口線合流車両の場合は実データの方がその時間が長く、環状線合流車両の場合はシミュレーションの方が危険車両と判定される時間が長い結果となっている。このように、潜在的に危ない合流車両の現れる時間が実データとシミュレーションとで異なるということは、対象区間には、本研究で構築した多重追従合流挙動モデルが合流挙動をよく表現できない車両もあることを意味しており、今後の研究課題といえる。

車両ID	潜在的な危険すると判断される合流車両が現れた時間																									
110238	実際結果	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2																	
	simulation結果		4.4	4.2																						
110281	実際結果	5	4.8	4.6	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4			
	simulation結果				4.4	4.2	4	3.8	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8						
110291	実際結果	4.6	4.4	4.2	4																					
	simulation結果		4.4	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0					
110298	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2																				
	simulation結果		4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6												
110308	実際結果	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
	simulation結果														2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
110324	実際結果	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2												
	simulation結果				2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0											
110403	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8													
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6												
110417	実際結果						3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6							
	simulation結果	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3																			
110451	実際結果	2.4	2.2	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0															
	simulation結果				1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0															
110565	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8																		
	simulation結果	5	4.8																							
110570	実際結果	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4															
	simulation結果			1.8	1.6	1.4																				
110601	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4																			
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2										
110646	実際結果	1.8	1.6	1.4	1.2																					
	simulation結果	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8																			
110663	実際結果	4.6	4.4																							
	simulation結果	4.6	4.4	4.2	4																					

図 6.24 守口線合流車両で潜在的に危ない合流車両が現れた時間

車両ID	潜在的な危険すると判断される合流車両が現れた時間																																																								
100026	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6																																																
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4																																																				
100075	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4																																																		
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4																																															
100153	実際結果	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2																																															
	simulation結果	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0																																				
100155	実際結果	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2																																														
	simulation結果	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2																																														
100220	実際結果				1	0.8	0.6	0.4	0.2	0																																															
	simulation結果	4	3.8	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0																																																
100230	実際結果	5	4.8	4.6	4.4																																																				
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0																															
100318	実際結果	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0																																					
	simulation結果	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8																																									
100409	実際結果				2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1																																											
	simulation結果	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2																																														
100459	実際結果	4.8	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6																																											
	simulation結果	4.8	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8																																																	
100461	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4																																																		
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4																																																				
100487	実際結果	5	4.8	4.6	4.4																																																				
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0																														
100520	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2																																									
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4																																										
100534	実際結果	4.4	4.2	4	3.8	3.6	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8																																												
	simulation結果	4.4	4.2				3.8	3.6																																																	
100536	実際結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2																																									
	simulation結果	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8																																												
100451	実際結果	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6																																								
	simulation結果	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6																																								
100577	実際結果	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4																																											
	simulation結果	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4																																											
100654	実際結果				4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2																																											
	simulation結果	4.2	4	3.8	3.6	3.4																																																			
100664	実際結果	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1																																												
	simulation結果	3.2				2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2																																						
110680	実際結果	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6																																																
	simulation結果	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6																																																
100685	実際結果	4.4	4.2	4	3.8	3.6																																																			
	simulation結果						3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8																																										
100708	実際結果	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8																																										
	simulation結果	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2																																		

図 6.25 環状線合流車両で潜在的に危ない合流車両が現れた時間

(3) 潜在的に危険な合流挙動に対するシミュレーション精度検証

前項では潜在的に危険($TTC^* < 5\text{sec}$)と判断される合流車両に着目してシミュレーション結果を検証した。本項ではさらに、実観測データとシミュレーション結果で潜在的に危ないと判断される合流車両に対して、相対速度-相対距離の時間的推移に着目する。まず、潜在的に危ない車両の挙動特性を把握するため、実観測データから危険車両を除いた合流車両($TTC^* > 5\text{sec}$)、及び危険車両($TTC^* < 5\text{sec}$)のみの相対速度-相対距離の時間的推移を図 6.26 と図 6.27 に示す。

守口線合流車両に対して注目すると、潜在的に危ない車両とそうでない車両の両方とも、第 2 象限から第 1 象限へ移動する曲線、第 4 象限から第 1 象限へ移動する曲線に分類される。まず、第 2 象限から第 1 象限へと移行する曲線は、横の車線のギャップを構成する車両との相対位置を保ちながら、減速して合流する車両を意味する。一方、第 4 象限から第 1 象限へと移行する曲線は、初めは合流車両が走行本車線のギャップ構成車両より前方に位置するが、速度は走行本車線の車両の方が大きい状態を表す。時間の経過によって、この曲線は徐々に第 1 象限に移動し、相対的に大きな速度で走行する走行本車線の車両が、合流車両より前方に位置するようになる。すなわちこのプロットは、速く走行する走行本車線の車両との相対距離が徐々に小さくなりながら、合流車両は走行本車線の車両との速度調整を行うという挙動を表す。

また、図 6.26 で潜在的に危ない車両($TTC^* < 5\text{sec}$)とそうでない車両($TTC^* > 5\text{sec}$)のプロットを比較すると、第 4 象限から第 1 象限に移動するプロットの場合、相対速度と相対距離の差が大きい状態で合流することが分かる。また、第 1 象限から第 2 象限に移動したプロットの場合も、相対距離はすべて 10m 以内で、相対速度の差は大きい。第 4 象限から第 1 象限に移動するプロットの場合は、合流車両が横車線の車両と比較的大きな相対距離で前方に位置しているが、相対的に速度が大きい横車線の車両によって、2 つの車両間の相対的な距離がますます小さくなりながら、Y 座標が横並びになる危ない瞬間が現れる。合流車両の運転者はこのような危ない瞬間を避けるため速度調整を行い、時間の経過によって 2 つの車両間の相対位置を変えながら、合流車両は横車線の車両に後方で合流する。したがって、最初は合流車両が大きな相対距離で前方に位置していても、相対的に大きな速度で走行する横車線の車両との合流挙動は潜在的に走行危険性が高いことが分かる。また、第 2 象限から第 1 象限に移動するプロットの場合は、危なくない車両に比べて、合流車両の相対位置は変わらないが、合流車両が相対的に大きな速度で走行すると、前方に位置する横車線の車両と合流車両間の相対距離が比較的小さくな

るので、合流車両の速度調整の中にも潜在的に危ない状況が存在することを意味する。

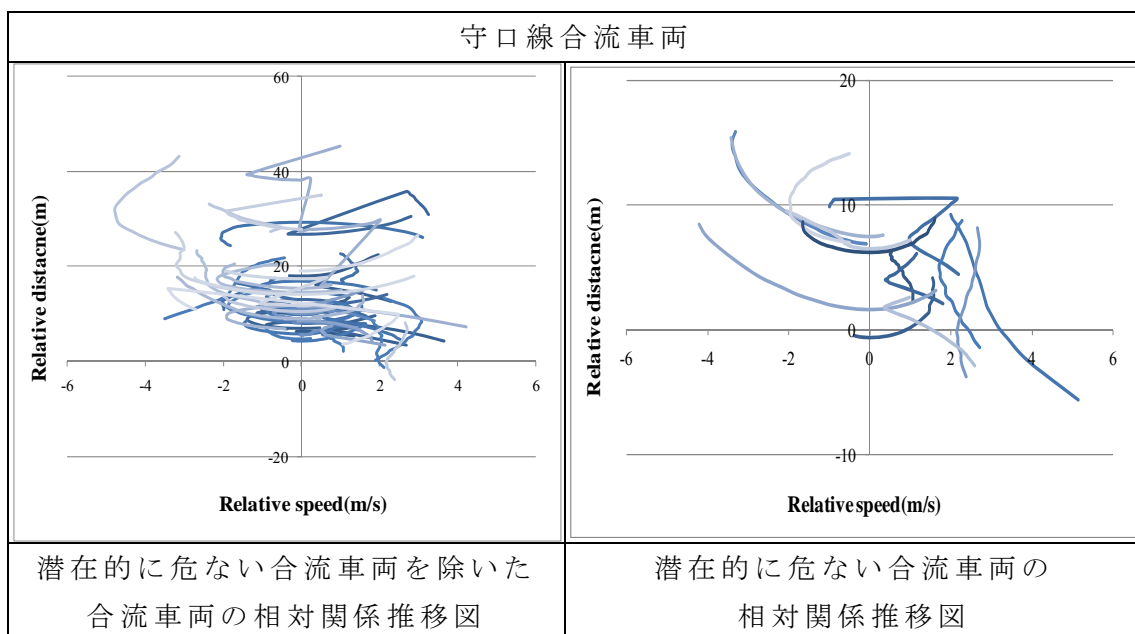


図 6.26 実データの、守口線合流車両の潜在的に危なくない車両と危ない車両に対する相対関係推移図

環状線合流車両に注目すると、図 6.27 のように、守口線合流車両と同様に、潜在的に危ない合流車両とそうでない合流車両のプロットが、第 4 象限から第 3 象限に移動するプロットと第 2 象限から第 3 象限に移動するプロットに分類されている。大部分にあたる第 4 象限から第 3 象限に移動するプロットは、横車線の車両との相対位置は変わらない状態で、速度調整を通じて合流する車両を意味する。また、第 2 象限から第 3 象限に移動するプロットは、最初は合流車両が横車線のギャップ構成車両よりも前方に位置するが、走行速度は相対的に小さい。時間の経過によって、このプロットは徐々に第 3 象限に移動し、相対的に大きな速度で走行する横車線の車両が合流車両より前方に位置するようになる。つまりこのプロットは、合流車両が選択ギャップで合流するために合流行動を調整する中で、後方の横車線の車両との距離がますます近くなり、相対位置が変わるケースである。

このような経緯を持つ環状線合流車両のプロットに対して、潜在的に危ない車両($TTC^* < 5\text{sec}$)とそうでない車両($TTC^* > 5\text{sec}$)のプロットを比べた。その結果、図 6.27 のように、第 2 象限から第 3 象限に移動するプロットの場合は、潜在的に危ないプロットとそうでないプロットの相対距離と相対速度の関係が似ている。しかし、第 4 象限から第 3 象限に移動したプロットの場合は、

潜在的に危ない車両がそうでない車両に比べて、比較的大きな相対速度と相対距離の関係で走行することが分かる．この場合、合流車両は横車線の車両と比較的大きな相対距離で後方に位置しているが、相対的に速度が大きいため、横車線の車両との距離が徐々に小さくなる．よって、Y座標が横並びになる危ない瞬間が現われるのである．合流車両の運転者はこのような危ない瞬間を避けるため、速度を調整してそのまま横車線の車両の後方で合流する．よって、相対位置は変わらないが相対速度の差が大きく、速度調整の中で危ない状況が発生する可能性があると分かった．

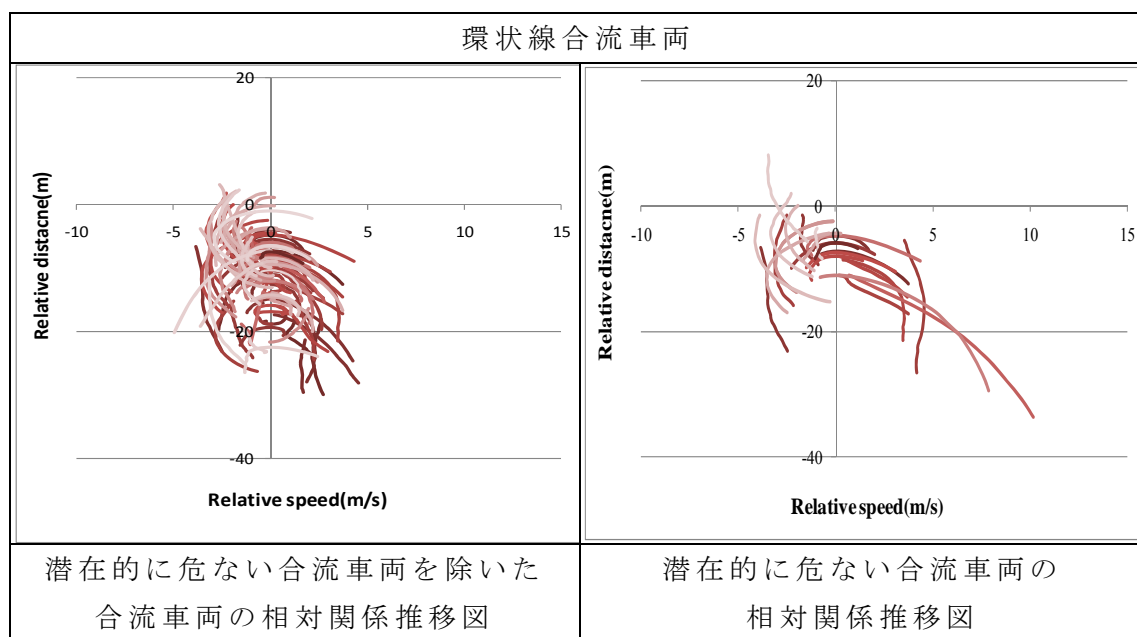


図 6.27 実データの、環状線合流車両の潜在的に危なくない車両と危ない車両に対する相対関係推移図

上で示したように、実際データで潜在的に危ない車両とそうでない合流車両の相対速度-相対距離の関係を分析した結果、合流挙動の特徴が異なっていることが分かった．そこで、潜在的な危険な合流挙動に対するシミュレーション結果の妥当性を分析した．図 6.28 と図 6.29 に実観測データとシミュレーション結果の、潜在的に危ない車両の相対速度-相対距離の関係を示す．分析の結果、上で示した潜在的に危ない合流車両に対する挙動の特性がシミュレーション結果で同様の相対速度-相対距離関係を持つことがわかった．ここから、本研究で構築したシミュレーションの結果が、本対象区間で潜在的に危なくない車両とは異なる特性を持つ危ない車両の挙動も、よく表現しているといえる．

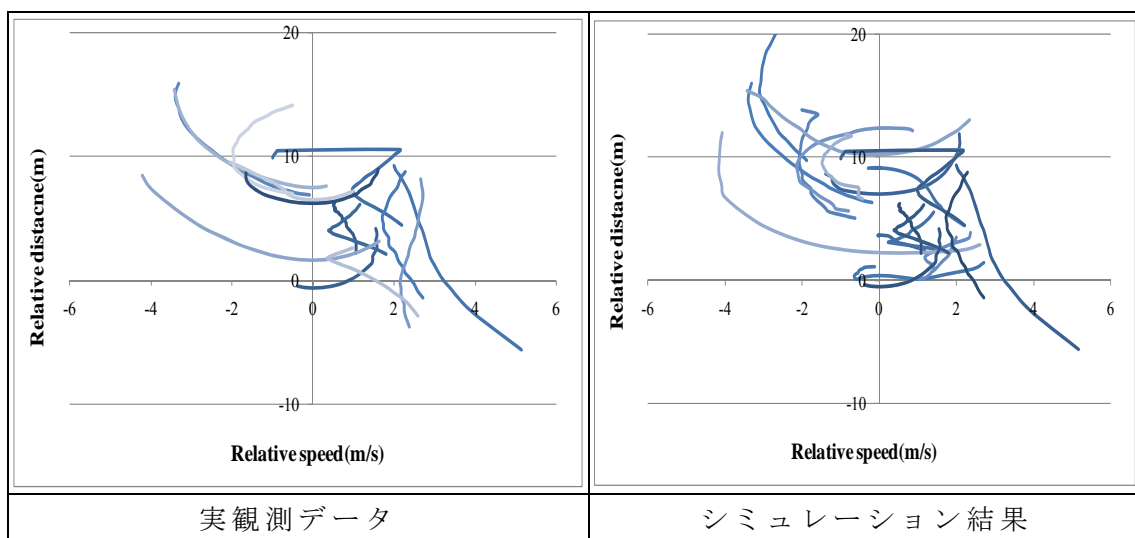


図 6.28 潜在的に危ない守口線合流車両の相対関係時間推移図

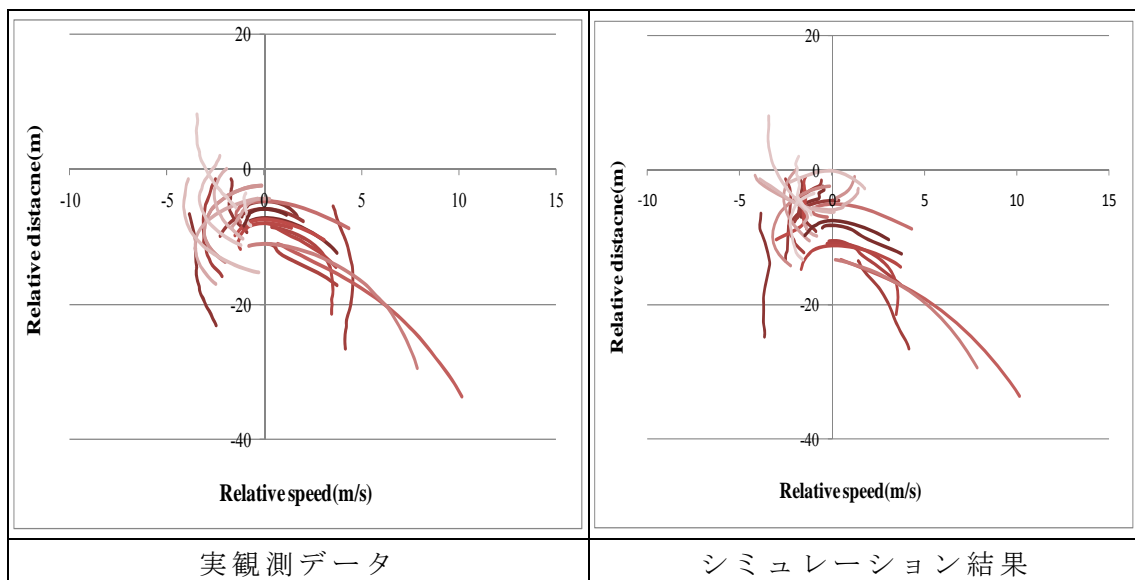


図 6.29 潜在的に危ない環状線合流車両の相対関係時間推移図

以上より，本研究で構築したシミュレーションを ITS のシステムである AC C(Adaptive Cruise Control), AVCSS(Advanced Vehicle Control and Safety System)などに利用することで，合流・追従走行中の運転者の安全性及び効率性を向上するための，危ない状況の事前情報や警報提供，自動調節走行などのモデルの基礎をつくることができる．また，このような潜在的に危ない状況をあらかじめ予測することで，潜在的に危ない合流車両による速度低下が引き起こす交通渋滞などを予防できると期待する．

6.5 結論

本章では、阪神高速道路の守環合流部での合流挙動に着目し、ビデオ画像データから抽出した車両軌跡データを用いて合流挙動のプロセスを分析した。特に、合流区間で現れる合流挙動うち、合流車両がギャップを選択した後、そのギャップに流入するため、合流に影響を及ぼす他の車両との関係から自車の速度を調整して合流するという挙動に焦点を当てて分析した。この時、本分析区間である守環合流部は、異なる交通特性を持つ2つの主道路（守口線、環状線）が合流する区間なので、合流車両を守口線合流車両と環状線合流車両に分類して、合流挙動に対する分析を行った。そのために、まず、合流車両と横の車線（走行本車線）の流入車両のうち、合流車両が選択したギャップを構成する前方（又は、後方）車両間の相対速度-相対距離に注目して、基本的な合流車両の挙動に対する現象分析を実施した。分析結果から、‘合流車両は同一車線の車両と横の車線の車両も意識して走行する’という仮定に基づき、合流完了時点から5秒前の車両データを利用して、守口線と環状線の合流車両に対して‘多重追従合流挙動’を表現するモデルを構築した。構築したモデルの分析結果に基づいて、合流車両の多重追従合流挙動を表すシミュレーションを行い、守環合流部での多重追従合流挙動を再現した。また、本分析区間で潜在的に危ない合流車両を定義して、その合流車両で多重追従合流挙動のシミュレーションを検証した。最後に、本対象区間での危ない合流挙動が現われるプロセスについて分析して、これが本対象区間の上流に及ぼす影響を考察した。上で示した分析結果から得た知見を整理すれば、以下のようになる。

- 1) 守環合流部での合流車両を抽出した結果、環状線合流車両に比べて守口線合流車両の台数の方が多い。これは、環状線からの流入車両間のギャップに守口線の車両が合流する場合が多いことを意味する。よって、環状線を走行する合流車両の方が守口線で走行する合流車両より一般的に優位であることを示唆する。
- 2) 合流車両と横の車線（走行本車線）から流入する車両のうち、合流車両が選択したギャップを構成する車両（前方または後方車両）の2車間の相対速度-相対距離の関係を分析した結果、時間の推移によって反時計回りのスパイラル曲線を描いて分布することが分かった。これは合流車両が横の車線の車両を意識して走行することを意味する。したがって、合流車両が横車線の車両に追従しながら合流する走行特性を考慮して、合流挙動を分析する必要性がある。

- 3) 同一車線だけでなく、横の車線（走行本車線）の車両を考慮して合流車両の多重追従合流挙動を分析した結果、同一車線のみを考慮した多重追従モデルよりも、本分析対象区間の合流挙動をよく描く結果となった。これは、合流車両は合流時に、同一車線の車両と横の車線の周辺車両から影響を受けて、互いに意識して走行するということを意味する。
- 4) 構築した多重追従合流モデルに基づいて、本対象区間での多重追従合流挙動に対してシミュレーションを行った。シミュレーション結果と実際結果との検証のため、各結果間の相対速度と相対距離に対する、相関関係を分析した。その結果、シミュレーション結果が実際の多重追従合流挙動をかなりよく表現していることが分かった。
- 5) 実際の結果に対して、交通コンフリクト指標である TTC で潜在的に危ない合流車両を分析すると、環状線合流車両の方が守口線車両より、危ない合流挙動で合流する車両が多いことが分かった。これは、環状線合流車両の方が相対的に大きな速度で選択ギャップに流入するため、減速して横並びになることが多いということを意味する。
- 6) 実際の結果とシミュレーション結果に対して、TTC で潜在的に危ない合流車両を分析すると、シミュレーション結果の方が潜在的に危ない車両の台数が多い。また、これらの車両が現れた時間（0.2 秒間隔）について、実際の結果とシミュレーション結果を比較すると、同一時間だけ現れた結果も存在するが、大部分は、実際の結果よりもシミュレーション結果の方が潜在的に危ない車両の現れる時間が長いという結果になった。これは、本対象区間の多重合流車両挙動の中には、構築した多重追従合流車両のモデルではよく表現できない合流車両が存在することを示しており、これは、今後の課題ともいえる。
- 7) 本合流区間で潜在的に危ない合流車両は、潜在的に交通コンフリクトが発生しており、同じ Y 座標側面では、時間の流れによって合流完了時点で遠くなるほど（上流側）速度が低いことが分かった。また、同じ時間座標側面で見れば、潜在的にコンフリクトが多く発生する地点で、Y 座標側面よりはその影響が大きくはないが、上流側に速度低下を起こすことが分かる。
- 8) 潜在的に危ない車両の速度が、合流車両と走行本車線のギャップ構成車両との相対速度や相対距離に及ぼす影響について分析した。その結果、合流車両の速度の増加によって、同じ Y 座標側面で相対距離は増加し、相対速度の差が大きいことが分かった。一方で、同じ時間座標側面では上流での合流車両の速度の増加によって、相対距離は減少して、相対速度の差は増加している。これは潜在的に危ない合流車両が上流の交通状態に影響を

及ぼすことを示しており、このような相対速度と相対距離は合流車両の多重追従合流挙動において、重要な要因となる。したがって、潜在的に危ない合流車両に対して明確に予測することの大切さが示唆される。

本研究での多重追従合流挙動に関する分析は、現在の合流挙動に対する交通ミクロシミュレーションにおいて重要な意味を持つ。これまで、合流挙動に対する研究の大部分は、高速道路のオンランプのように、主道路と従道路が合流する区間での合流車両のギャップ選択行動に焦点が合わされてきた。また、合流区間に対するミクロな観点での運転者の行動（e.g. 追従行動、車線変更行動、合流行動など）に関する研究は少ない。本研究での多重追従合流挙動の分析は、合流区間での運転者の行動について、合流行動に対する既存の分析方法とは違う視点からアプローチしており重要な意味を持つ。合流車両に対し、同一車線の車両だけではなく、周辺車両も影響を及ぼすので、合流挙動を表現する際には、同一合流車線の車だけではなく、横の車線の車両も考慮する必要がある。また、合流車両の多重追従合流挙動を分析することで、合流車両がギャップを選択した後、追従しながら合流する車両の合流プロセスが解釈可能となった。合流区間でのこのような複雑な運転者の行動を明確に示すことができれば、運転者の行動が原因である交通渋滞や事故を抑制する施策を提案することができる。

しかし、本研究では多重追従合流挙動に対して、合流車両がギャップ選択を完了した時点からの運転者の行動について分析した。実際の合流挙動では、ギャップの選択行動と、ギャップ選択後に速度調整を通じて合流する多重追従挙動が同時に現れるので、この2つの行動を連結する過程を説明する必要がある。また、本研究で構築した多重追従合流挙動モデルの説明力は、守口線合流車両の場合は約70%、環状線合流車両の場合は約90%であり、このモデルで説明できない多重追従合流挙動が存在するということがわかる。このように説明できない多重追従合流挙動は、運転者の異質性の特性によっても発生する可能性がある。したがって、本研究では合流完了時点から5秒前のデータを利用して一つの多重追従合流モデルを構築したが、今後の研究では、さらに多くの車両データを利用して合流車両ごとのモデルを構築し、運転者の異質性を考慮した合流区間での多重追従合流挙動を説明するが必要である。

参考文献

- [1] 大口敬. 高速道路単路部渋滞発生解析－追従挙動モデルの整理と今後の展望－, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp39-51, 2000.
- [2] 山崎浩気, 高山純一, 中山晶一郎, 宇野伸宏. “一般道路合流部におけるミクロ交通シミュレーションのための合流挙動解析”, 第33回土木計画学発表会・講演集, 2006.
- [3] 若林拓史, 高橋吉彦, 新実栄浩, 蓮華一巳. “交通流ビデオ解析システムを用いた交通コンフリクト分析と新しい危険度評価指標の提案”, 土木計画学研究・論文集, Vol.20.No.4, pp.949-956, 2003.
- [4] 渡辺将光, 中村英樹. “ビデオ画像を用いた都市高速合流部における合流挙動に関する分析”, 第32回土木計画学研究発表会, 2005.
- [5] 内山久雄. “高速道路において工事時の合流意思決定プロセスのモデル化”, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp29-37, 2000.
- [6] 山田稔, 鈴木徹. 街路の追従走行における速度と車間距離の変動に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.10, pp.87-94, 1992.
- [7] Bando, M. et al, “Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation”, *Physical Review* E51, pp.1035-1042, 1995.
- [8] Ben-Akiva, M.E., Koutsopoulos, H.N., Mishalani, R.G. and Yang, W. “Integrated simulation framework for evaluation dynamic traffic management systems” *Proceedings of the First World Conference on Applications of Transport Telematics and Intelligent Transportation Systems*, France, 1994.
- [9] Brockfeld, E., and Kuhne, R.D. et al., “Calibration and validation of microscopic traffic flow models” *Presented at 83th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2004.

- [10] Bexelius, S. "An extended model for car-following", *Transportation Research*, Vol.2, pp.13-21, 1968.
- [11] Brackston M. and McDonald, M. "Car-following: A historical review", *Transportation Research Part F*, pp.181-196, 1999.
- [12] Drew, D.R. "Traffic flow theory and control", *McGraw Hill*, 1968.
- [13] Forbes, T., Zagorshki, H., Hoishouser, E. and Deterline, W. "Measurement of driver reactions to tunnel condition", *Highway Research Board Proceedings* 37, pp.345-357, 1958.
- [14] Fazio, J. Michaels, R.M. Reilly, W.R. and Schoen, J. Poulis. "Behavioral model of freeway exiting", *Transportation Research Board* 1281, pp.6-27, 1990.
- [15] Gazis, D.C., Herman, R. and Rothery, R.W. "Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow", *Operation Research*, Vol. 4, pp.545-567, 1961.
- [16] Gipps, P.G. "A model for the structure of Lane Changing Decisions", *Transportation Research*, Vol. 20B, No.5, pp.403-414, 1961.
- [17] Helly, W. "Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow", *In Proceedings of the symposium on theory of traffic flow, Research Laboratories, General Motors*, pp.207-238, 1959.
- [18] Hong, D.H., Uno, N. and Kurauchi, F. "Empirical analysis of driver's Car following heterogeneity based on video image data", *The Twelfth International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, pp.401-410, 2007.
- [19] Hong, D.H., Uno, N. and Kurauchi, F. "Heterogeneity in multi-anticipative car-following behavior by video image data", *International Journal of ITS Research*, Vol. 7, No. 1, Special issue, 2009.
- [20] Hoogendoorn, S.P., Ossen, S. and Schreude, M. "Empirics of multi-

- anticipative car following behavior”, *Transportation Research Record*, No.1965, pp.112-120, 2006.
- [21] Hoogendoorn, S.P., Ossen, S. and Schreuder, M. “Properties of a microscopic heterogeneous multi-anticipative traffic flow model”, *Transportation and Traffic Theory* 2007, pp.583-606.
- [22] Kita, H. “A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic”, *Transportation Research Part A*, No.33, pp.305-312, 1999.
- [23] Kita, H. “Effect of merging lane length on the merging behavior at expressway on ramps”, *Transportation Research Part B*, Vol. 15B, pp. 143-148, 1993.
- [24] Lenz, H., Wanger, C.K. and Sollacher, R. ”Multi-anticipative car-following model”, *The European Physical Journal B*(7), pp.331-335, 1999.
- [25] Mousa, R.M., Roupail, N.M. and Azadivar, F. “Integrating microscopic simulation and optimization”, *Application to freeway work zone traffic*, *Transportation Research Record* 1254, pp.14-25, 1992.
- [26] Ossen, S. and Hoogendoorn, S.P. “Car following behavior analysis from microscopic trajectory data”, *Transportation Research Record*, No.1934, pp.13-21, 2005.
- [27] Ossen, S., Hoogendoorn, S.P. and Gorte, B. “Inter-driver differences in car following: a vehicle trajectory based study”, *Presented at 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2006.
- [28] Reilly, R.M., Fazio, and Michaels, J. “Driver behavior model of merging”, *Transportation Research Record*, No.1213, pp.4-10, 1989.
- [29] Zarean, M. and Nemeth, Z.A. “WEAVSIM: A Microscopic simulation model of freeway weaving”, *Transportation Research Record* 1194, pp.48-54, 1990.

第 7 章 結論

7.1 本研究の成果

本研究では、交通渋滞や事故が頻発している阪神高速道路の守口線・環状線合流部（守環合流部）を対象として、合流部における交通安全性及び効率性に関する評価方法を提案するための基礎研究として、合流区間の車両挙動を分析した。本研究の分析には、高精度デジタルビデオカメラの画像データを連結・平滑化し、目視によって手動で収集した 15 分間の詳細な車両走行軌跡挙動データを適用した。このデータを利用して、まず、直前の車両の挙動に応じて自車の追従挙動を決定する単独追従挙動を仮定して、追従挙動モデルの構築、ならびに、と運転者の追従行動に影響を及ぼす要因を分析した。また、多重の前方車両に応じる多重追従挙動を想定して、追従挙動モデルを構築するとともに、注目して運転手の異質性について分析し、合流区間に現れる多重追従合流挙動の分析と合流プロセスに対する分析を行った。これらの分析で、本研究で各章ごとに得られた具体的な研究成果は以下のとおりである。

第 2 章では、ビデオ画像データから車両データを抽出する方法と運転者の行動に関する既存研究の内容に基づいて、本研究の位置づけを以下のように示した。

- 1) ビデオ画像データ上の車両のプロットを手動で抽出するシステムと、同一車両に対するカメラ間の連結システムを開発して、本対象合流区間でのビデオ画像データから精緻な車両データを取得することが本研究の特色の一つである。
- 2) ビデオ画像データから取得した精緻な車両データを利用して、車両追従行動において運転者の異質性とそれに影響を及ぼす要因について議論する。
- 3) 分析した運転者の追従行動に基づいて、運転者の多重追従挙動を仮定し、追従モデルのパラメータ推定を行うとともに、道路幾何構造による多重追従行動の異質性について議論する。
- 4) 本分析対象区間である合流区間の中でも、合流ギャップ選択前後の車両挙動に着目し、運転者の合流しながら追従する行動を分析して、合流挙動に関するモデルを構築して、合流区間で発生する合流過程を分析し解釈する。

第 3 章では、ビデオ画像データから目視によって手動で車両データを抽出する方法に関する内容を示した。この研究の結果を要約すると、以下のである。

- 1) 阪神高速道路で 15 分間の画像データを使用し、目視により手動で車両軌跡プロットの抽出を行った。
- 2) 抽出した車両軌跡プロットに対して、コンピューターの静止画像上の車両に、観察者が手動でクリックすることで、車両の位置、カメラ番号、車両 ID、時間、日付などの情報を記録するシステムを開発して、15 分間の全車両に対する軌跡データの情報を取得した。
- 3) 複数のカメラで測定した車両軌跡データの誤差を減らすため、カメラ間の同一車両 ID の確認システムとカメラ間の軌跡を連結するシステムを開発した。このシステムを利用して、複数のカメラ間の同一車両に対する連結された軌跡データを取得した。
- 4) 車両軌跡プロットは手動取得システムの画面解像度や偶然誤差などによりそれぞれに観測誤差を含むので、車両軌跡の平滑化を通じて、一体化された約 2400 台の車両軌跡を取得した。

第 4 章では、抽出した車両挙動データを利用して、都市高速道路への合流部を含む分析対象全区間に対する運転者の単独追従挙動を分析した。特に、追従挙動に対する運転者間の異質性及び追従挙動に及ぼす影響要因に対しても分析を行った。この結果を要約すると、以下のよう書ける。

- 1) Helly モデルが GM モデルに比べて対象区間の追従車両の追従挙動をよりよく説明する。
- 2) 追従車両の運転者は相対距離よりも、相対速度により敏感に応じて追従する傾向がある。
- 3) Helly モデルのパラメータ C_2 が負(-)になる追従車両はかなり多数存在し、運転者別に前方の車両に応じるパラメータと反応時間は多様な値をとるので、運転者間の異質性が存在するといえる。
- 4) 交通密度の影響に着目するとは、低密度での追従車両は相対的に前方車両の挙動に対する反応が緩慢であり、パラメータの存在範囲が広く、追従挙動の運転者間の差異が拡大する傾向がある。よって、低密度では追従車両は前方車両に対してあまり敏感に反応していないといえる。
- 5) 車線による影響では、反応時間は第 1 車線で大きくなる傾向があり、相対的に緩慢な追従挙動が見え、第 2,3 車線での両パラメータの存在範囲が他の車線に比べて広く分布する。よって、第 2,3 車線では追従車は「合流行動」の影響によって特に相対速度変化に対して敏感に反応する車両が多

い.

- 6) 区間特性の差異による影響では、直線区間においてパラメータの分布する範囲が最も小さくなり、合流区間で全般的に大きくなる傾向がある。反応時間はカーブ・合流区間で短くなり、直線区間では反応時間の短い車両が少ない傾向がある。よって、カーブ・合流区間の走行車両は直線区間に比べて敏感な追従挙動が多い。

第 5 章では、11 個のカメラから得たビデオ画像の車両軌跡データを利用して、都市高速道路での多重追従挙動を想定して、追従モデルの構築ならびに分析を行った。さらに、道路の幾何構造が多重追従挙動に及ぼす影響に関する分析も行った。この結果を要約すると、以下のように書ける。

- 1) 本研究対象地域の追従行動は、多重車両追従モデルの方が単独車両追従モデルよりも説明力高く記述できることがわかった。これは運転者が直前の前方車両だけでなく、2 番目や 3 番目の前方車両の行動に応じて追従する可能性が高いということを意味する。
- 2) 一般的に 1 番目の前方車両の行動は、2 番目や 3 番目の前方車両よりも、追従車両に及ぼす効果が大きいことがわかった。しかし、追従行動をよりよく理解し説明するためには、2 番目や 3 番目の前方車両が及ぼす効果も無視できない。
- 3) 追従車両の運転者に対するパラメータ α_j , β_j と反応時間の多様な分布から、運転者間の追従行動の異質性が見て取れる。
- 4) 主成分分析とクラスタ分析を適用した結果から、追従行動が分類できる可能性を示し、各クラスタによって運転者の追従行動が多様であることがわかり、追従行動に対する運転者間の異質性が存在することを証明した。
- 5) 道路の幾何構造の特性は、追従行動の区間別の最適多重追従モデルに影響を及ぼす。これは追従行動分析の際には、道路の幾何構造の特性を考慮して分析する必要があることを示唆している。

第 6 章では、守環合流部での合流挙動に着目し、ビデオ画像データから抽出した車両軌跡データを用いて合流挙動のプロセスを分析した。特に、合流区間の合流ギャップ選択前後で現れる合流挙動のうち、多重追従合流挙動に焦点を当てて分析した。この結果を要約すると、以下のように書ける。

- 1) 守環合流部での合流車両を抽出すると、環状線合流車両よりも守口線合流車両の台数の方が多い結果となった。これは、環状線からの流入車両間のギャップに守口線の車両が合流する場合が多いことを意味する。よって、環状線を走行する合流車両が守口線で走行する合流車両より一般的に優

位であることを示唆する．

- 2) 合流車両と選択ギャップを構成する車両間の相対速度-相対距離の関係を分析した結果，時間の推移によって反時計回りのスパイラル曲線を描いて分布することが分かった．したがって，合流車両が横の車線に追従しながら合流する走行特性を考慮して，合流挙動を分析する必要性がある．
- 3) 同一車線のみを考慮した多重追従モデルより，合流車両に影響を及ぼす横の車線の車両を考慮した多重追従合流モデルの方が，本分析対象区間の合流挙動をよく描くことが分かった．これは，合流車両は同一車線の車両と横の車線の周辺車両から影響を受け，互いに意識して走行するということの意味する．
- 4) シミュレーション結果と実際の結果との関係を検証するため，相対速度と相対距離の相関関係を分析した．その結果，シミュレーション結果が実際の多重追従合流挙動をかなりよく表現することが分かった．
- 5) 実際の結果に対して，交通コンフリクト指標である TTC を用いて潜在的に危ない合流車両を分析した結果，環状線合流車両の方が守口線車両よりも，危ない合流挙動で合流する車両が多い．これは，環状線合流車両の方が相対的に大きな速度で選択ギャップに流入するため，減速して横並びになる瞬間が多いということの意味する．
- 6) 実際及びシミュレーションの結果に対して，TTC で潜在的に危ない合流車両を分析すると，シミュレーション結果の方が潜在的に危ない車両の台数が多い結果となった．潜在的に危ない車両が現れた時間（0.2 秒間隔）は，大部分が，実際の結果よりもシミュレーション結果の方が長い結果であった．これは，本対象区間の多重合流車両挙動の中に，構築した多重追従合流車両のモデルではよく表現することができない合流車両が存在することを示している．
- 7) 本合流区間で潜在的に危ない合流車両は，潜在的に交通コンフリクトが発生して，上流側に速度低下を起こすことが分かる．

以上が，本研究で得られた成果である．本研究では阪神高速道路の合流部での運転者の単独追従挙動の行動に基づいて，既存とは違う視点で，合流区間を含む全区間での多重追従挙動と合流区間での多重追従合流挙動を分析して，合流区間で現れる合流プロセスを示した．しかしながら，合流区間では多重追従合流挙動だけでなく，ギャップ選択挙動が同時に現れるので，これらの挙動間の連結が必要であり，さらなる前方や周辺車両及び要因を考慮した合流挙動モデルが必要と考えられる．そして，十分な車両軌跡データを用いて，運転者の異質性を考慮した合流車両挙動を説明するモデルを開発することも重要である．本研究では車両

の挙動を分析する時、ビデオ画像から抽出した 15 分間のデータのみを利用して分析した。しかし、今後の自動車認知システムの開発を通じて、より効率的に十分な車両軌跡データを抽出し、このデータを利用して合流挙動のプロセスを明白にできることを期待する。

7.2 今後の課題

本研究は手動で取得した精緻な軌跡データを用いて、車両追従挙動と合流挙動について分析を行った。この研究で得られたそれぞれの知見に基づいて、より詳細で明確な合流部の車両挙動の分析を通じて合流挙動のメカニズムを明らかにする必要がある。また、合流部での合流挙動を考慮した交通安全性及び効率性の評価方法を提示するためには、さらに多くの検討を要すると考えられる。これに対する今後の研究の方向性を以下に示す。

- 1) 本研究ではビデオ画像データから手動で車両軌跡プロットを取得したのだが、この作業は多大な労力、膨大な時間、莫大な費用を要するため、さらに長時間、長区間の分析を行うことはかなり困難だと言える。また得られた車両軌跡データは、自動取得データに比べると確かに正確であるが、手動取得データでも各カメラで観測者の観測誤差が生じ、それが本研究を進めるに当たって非常に悩ましい問題となったと言わざるを得ない。車両軌跡データの自動取得精度の向上を心から期待する。
- 2) 単独追従挙動に関しては、解析の容易性のために今回は Helly モデルと GM モデルのみでパラメータ推定をして、運転者の異質性に影響を及ぼす要因に対する分析を行ったのみであるが、今後は別の、より説明能力の高いモデルでもパラメータ推定を行う必要がある。
- 3) 本研究では合流区間を含む全区間に対する多重追従挙動を分析した。また、運転者間の異質性と道路の幾何構造による特性も考慮して多重追従挙動の特性を分析した。追従車両は多くの前方車両からの影響を受けると予想できるが、車両データの限界のため本研究では 3 台の前方車両に対する影響のみの分析となった。したがって今後は、十分な車両の軌跡データからより前方の車両を含む多重追従車両モデルを構築し、運転者の多様な特性をさらに考慮する必要があるといえる。
- 4) 本研究では合流完了時点から 5 秒前の車両軌跡データを利用して、一つの多重追従合流挙動モデルを構築した。しかしながら、合流区間では多重追従挙動及び合流ギャップ選択挙動が同時に現れる。したがって、この 2 つの挙動は本来、同じ合流挙動を表すものであるため、それぞれのモデルを統合したものを推定するのが望ましい。このモデルが構築されれば、合

流挙動を表現する交通シミュレーションの再現性と汎用性のさらなる向上に結びつくと考えられる。

- 5) 本研究では合流完了時点から 5 秒前の車両軌跡データを利用して、一つの多重追従合流挙動モデルを構築した。しかしながら、構築した多重追従合流挙動に対するモデルの説明力が約 70%, 90%で、よく説明できない多重追従合流挙動も存在する。したがって、より十分な車両軌跡データに基づいて、様々な要因と個人間の異質性を考慮するモデルを構築する必要がある。
- 6) 本研究ではモデルの再現性を検証するため、実際の結果とシミュレーションの結果に対する相関関係と交通コンフリクト指標である TTC で潜在的に危ない車両に対する分析を行った。しかし実際には、他にも様々な交通コンフリクトの指標があるので、これを考慮してシミュレーションの再現性を検証する必要がある。

このように得られた成果と今後の課題によって、合流区間の合流プロセスを理解し、それが交通シミュレーションの再現性向上に向けての取り組みに活かされ、安全で効率的な道路交通システムの発展に役立つことを希望する。

謝辞

本論文を結ぶにあたり、京都大学への留学が決まった当時を考えて見ると、今も胸がときめきます。あの時から 3 年という時間が経って、今、学位論文の謝辞を書くことができました。多くのことを学ぶことができた短いながらも長かった 3 年という留学生活は、勉強に対する純粋な熱情によって、どんな多様な難しさを乗り越えることができる力を学ぶ、立派なきっかけになりました。この世を渡る知恵、勉強の前で自分という壁に向い合って見る時間、最後には謙遜な姿勢で挑戦することができる大きい機会を学びました。このような良い経験を私に教えてくれた 3 年という時間は、私の人生において意義深い時間でした。

はじめに、主査を務めて頂いた京都大学大学院工学研究科の谷口 栄一教授、副査を務めて頂いた京都大学大学院工学研究科の藤井 聡教授へ感謝の念を申し上げます。学位論文の予備検討過程から公聴会まで私に教えてくださった研究の方向性、そしてこれからの研究の適用方策などを通じて、これから本論文をさらに発展させられるように頑張ります。多くのものを学びました。感謝の言葉を申し上げます。また、京都大学大学院工学研究科の宇野 伸宏准教授、岐阜大学土木工学科の倉内 文孝准教授にご感謝の念を申し上げます。私が日本へ留学することができる機会をくださり、初めて日本に到着した時から、今この瞬間まで暖かい父のように接してくださり、多くのものが右も左も分からない留学生活に先生たちの助けがなかったら、今日の時間は私にできなかったはずだと思います。本当に 3 年という時間、研究に対して多くのものなどを教えて頂き、本当に先生たちに学位論文を指導して頂いたことを感謝しています。先生方が、私の先生であるという事実が非常に幸せです。本当に感謝いたします。また、今は故人になりましたが、本論文の内容に対して多くのことを教えてくださった北村 隆一教授そして京都大学大学院工学研究科の吉井 稔雄准教授、塩見 康博助教、菊池 輝助教にご感謝の念を申し上げたい。私が日本に来る前から、お目にかかりたかった（社）システム科学研究所会長の飯田 恭敬京都大学名誉教授へ感謝の念を申し上げます。また、データの提供などをいただいた、システム科学研究所、阪神高速道路株式会社と住友電気工業株式会社にも感謝の念を申し上げます。

また、私の修士課程時の指導教授で、いつも面倒を見てくださって、手伝ってくれて応援してくださったソウル市立大学校の Soobeam Lee 教授にも感謝の念を申し上げます。先生がいつも手伝って頂けたから、このような留学をすることができましたし、今日の謝辞を書くことができるようになりました。教授にとって誇らしい弟子になるように努力します。そして、京都大学大学院工学研究科の都市社会工学専攻交通情報工学研究室の諸先輩や後輩にも多くの貴重なご意見とご協力を承った。感謝の意を表します。また、一緒に勉強し頑張ってきた韓国留学生たちにも感謝の意を表します。

最後に、いつも力になってくださった私の神様と家族、友達、韓国での諸先輩や後輩にも感謝の気持ちを伝えたい。

2009年8月

洪 多禧